1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

Nos anos 90 as empresas brasileiras passaram por um período de economia recessiva que forçou atitudes de sobrevivência, com reduções de investimentos em pesquisa aplicada, de desenvolvimento de melhorias de processos e de pessoal de apoio à produção, mantendo-se apenas pessoas especializadas na fabricação. Atualmente, com a abertura de mercado e conseqüente aumento da concorrência por parte de empresas estrangeiras, fez-se necessário rever os processos produtivos para aumento de competitividade e permanência no mercado globalizado.

Este trabalho foi motivado pelo fato de que o processo escolhido, a têmpera, é fortemente dependente da experiência dos engenheiros, técnicos e operadores, também denominados "especialistas", o que não permite uma adequada visibilidade das oportunidades de melhoria da produtividade e eficiência do processo de fabricação.

1.2. Objetivos

O objetivo deste trabalho é propor um sistema que gere parâmetros de processo, aqui denominado por GSP – gerador de "set-point", de um dos fornos de têmpera contínua utilizado pela Mangels Indústria e Comércio Ltda. – Divisão Aços, possibilitando uma atuação fundamentada e robusta para conseguir ganhos de produtividade e eficiência.

1.3. Justificativas

Felizmente, durante os anos recessivos, a maioria das empresas manteve a força de trabalho que possui o conhecimento das práticas industriais, preservando o conhecimento acumulado.

Para ajustar-se um processo, de forma fundamentada, é importante o conhecimento do modelo que determina o funcionamento do equipamento industrial. A determinação do modelo pode ser feita de várias formas, porém a mais precisa é a matemática, mas o levantamento do modelo matemático pode ser, na maioria das vezes, dispendioso para muitas empresas nacionais, e, mesmo que ainda não seja o aspecto financeiro, a modelagem matemática é, normalmente, demorada.

Procurou-se neste trabalho um processo de modelagem que fosse rápido, econômico e que aproveitasse a experiência e conhecimento dos especialistas.

1.4. Metodologia

Inicialmente, investigou-se, através de livros e artigos, as diversas formas de modelagem.

Uma vez decidido pelo uso da lógica “fuzzy”, foram estudadas alternativas de representação dos modelos nebulosos e seus algoritmos de identificação, e selecionados livros e artigos voltados a aplicação da lógica "fuzzy" como solução para o controle de sistemas industriais.

Passou-se então para a determinação do método de domínio do problema, chegando-se à conclusão que o mais adequado seria o de fazer um gerador de “set-point - GSP” seguindo as etapas sugeridas na literatura pesquisada.

Em seguida realizou-se as proposições do projeto, com determinação das variáveis de entrada e saída, da base de conhecimento, do universo de discurso e da etapa de saída. Com isto propôs-se um modelo.

Desenvolveu-se a implementação do modelo, utilizando a plataforma MATLAB® e o banco de dados disponível na empresa.

Após o ajuste do modelo, baseado no banco de dados, fez-se os ensaios em campo

validando desta forma o modelo. Os ensaios foram realizados na Mangels Divisão Aços em um de seus fornos de têmpera contínua para materiais largos.

1.5. Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em 7 capítulos:

O primeiro apresenta os motivos, objetivos, metodologia e a estrutura deste trabalho.

O segundo apresenta as diferenças entre a modelagem clássica e a modelagem heurística, vantagens e desvantagens.

O terceiro faz uma revisão da teoria de conjuntos “fuzzy” que serve de base teórica para compreensão dos demais capítulos do trabalho. No Apêndice é apresentada a matemática "fuzzy".

O quarto faz uma breve descrição do processo de têmpera, que permite ao leitor entender a lógica do processo de tratamento térmico contínuo de aços ao carbono e a importância do processo de resfriamento para atingirmos a qualidade especificada.

O quinto descreve o forno de têmpera contínua utilizado na Mangels, apresentando e explicando a função de todas as partes do equipamento.

O sexto apresenta o desenvolvimento do projeto utilizando a lógica “fuzzy”, as simulações, os testes em campo com as métricas e os resultados e comentários pertinentes.

O sétimo conclui e apresenta sugestões para futuros trabalhos.

2. MODELAGEM

2.1. Modelagem Clássica

A meta primeira da Engenheira de Controle é obter estabilidade e máxima performance dos processos industriais, que garantam o mínimo custo, no menor tempo possível com a qualidade especificada. Para tanto deve-se saber como controlar o processo e o equipamento, aqui generalizado por sistema.

Na teoria clássica a forma utilizada para simular e/ou projetar controladores e analisar sistemas está na determinação de modelos matemáticos elaborados através do estudo das leis físicas que descrevem sua dinâmica.

2.1.1. Classificação dos Sistemas

Os sistemas podem ser classificados como [Garcia - 05]:

- Estático – não possui armazenadores de energia ou, mais genericamente, não possui "memória", isto é, uma vez aplicada uma entrada fixa no tempo, a saída assume, instantaneamente, um valor que também ficará fixo no tempo;
- Dinâmico – nesse sistema, ao se aplicar uma entrada fixa no tempo, a saída apresentará um transitório provocado pelos armazenadores de energia, ou mais genericamente, pela "memória" do sistema. Exemplos de elementos que provocam o efeito de "memória" são; capacitores, massas (inércia), indutores, tempo de cálculo de um computador que atua no processo, etc.;
- Linear – uma das condições de linearidade do sistema é ser válido o princípio da superposição. Este princípio afirma que sendo $u_1(t)$ um sinal de entrada e $y_1(t)$ a correspondente saída e $u_2(t)$ outro sinal de entrada e $y_2(t)$ a

outra correspondente saída, ele é linear se ao aplicarmos um sinal $k_1.u_1(t) + k_2.u_2(t)$ resultar na saída $k_1.y_1(t) + k_2.y_2(t)$. Para o sistema linear, a equação matemática das variáveis dependentes é do primeiro grau;

- Não-linear – neste caso não é aplicável o princípio da superposição. Assim não se pode obter a resposta a duas entradas simultâneas considerando as entradas aplicadas separadamente e somando-se os resultados;
- Contínuos – utilizam equações diferenciais para descrever o sistema;
- Discretos – utilizam equações de diferenças para descrever o sistema. A relação entre entrada e saída é analisada em instantes eqüidistantes de uma unidade de tempo t que assume valores 1, 2, 3, ...;
- Número de entradas e saídas – o sistema pode ter uma ou mais entradas e uma ou mais saídas. Chama-se de SISO os sistemas que possuem uma entrada e uma saída, de MIMO os sistemas que possuem várias entradas e várias saídas;
- Variantes ou invariantes no tempo – sistemas invariantes no tempo são aqueles em que os parâmetros são fixos ao longo do tempo, por exemplo, a inércia do rotor de um motor não varia a medida que o motor trabalha. Já para os sistemas variantes no tempo, os parâmetros não são fixos, por exemplo, um foguete a medida que se desloca e queima o combustível tem seu peso diminuído.

2.1.2. Modelagem convencional

A teoria de controle convencional provê diversos métodos para o projeto de controladores para sistemas dinâmicos. A seguir alguns dos mais utilizados:

- ***Controle clássico:*** Utiliza métodos de análise no domínio da freqüência através dos diagramas de Bode, Nyquist e do método do lugar das raízes.
- ***Controle moderno:*** Utiliza modelo em variáveis de estado para sistemas do tipo MIMO. Como exemplo sistemas lineares, MIMO e invariantes no tempo podem utilizar de equações de estado do tipo:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

$$u(t) = Cx(t) + Du(t)$$

Cuja matriz de transferência é:

$$G(s) = C(sI - A)^{-1} B + D$$

- ***Controle Ótimo:*** O objetivo deste método é o de determinar os sinais que irão atuar no sistema de forma a satisfazer limitações físicas e ao mesmo tempo minimizar ou maximizar algum critério de desempenho [Kirk - 70]. Utiliza métodos como: programação dinâmica, cálculo variacional, princípio do mínimo de Pontryagin´s, equações de Hamilton-Jacobi-Belman e RLQ - Regulador Linear Quadrático.

Além dos sitados, existem outros como “Controle Robusto” (controle H2 e Hinfinito), “Métodos Não-Lineares” (método de Lyapunov), “Controle Adaptativo” (reguladores auto-reguláveis, controle adaptativo não linear), “Controle Estocático”, “Controle por eventos discretos”, dentre outros.

2.2. Modelagem Heurística

Enquanto a modelagem matemática, através das equações diferenciais, é a linguagem do controle convencional, a heurística é a linguagem da modelagem "fuzzy" [Passino & Yurkivich – 98].

Dependendo da complexidade do sistema, a determinação das equações diferenciais que descrevem o sistema pode se tornar um processo trabalhoso e custoso, obrigando o projetista a adotar condições de contorno que podem comprometer a precisão desejada.

A Figura 2.1 sugere, de forma esquemática, uma relação entre a complexidade do sistema vs. precisão inerente do modelo dependendo do método de modelagem utilizada. Pode-se notar que para sistemas pouco complexos, a modelagem matemática apresenta descrições precisas. Para sistemas um pouco mais complexos, em que se possui uma significante quantidade de dados, a modelagem com redes neurais pode ser utilizada para reduzir incertezas através do treinamento da rede. Já para sistemas complexos em que não se dispõem de muitos dados numéricos e as informações existentes são ambíguas e imprecisas, a modelagem "fuzzy" é recomendada.

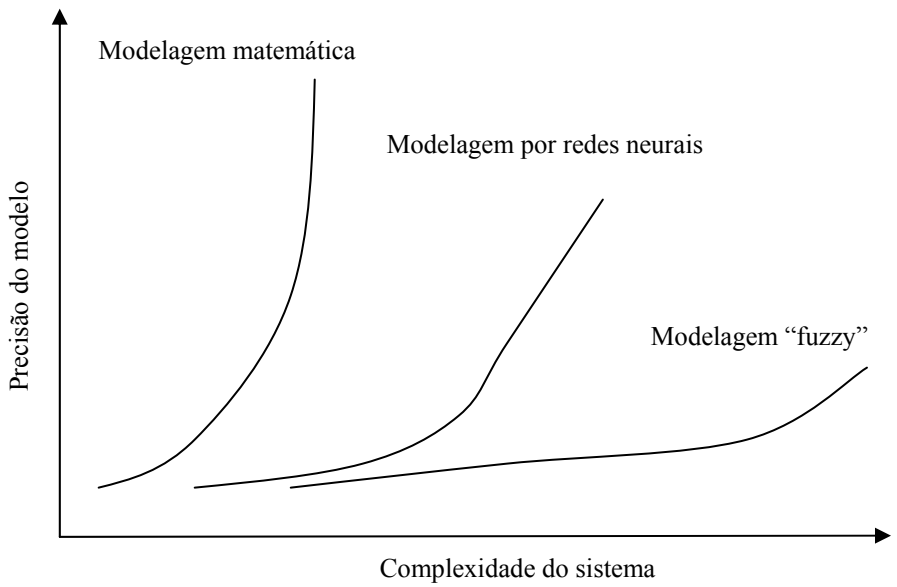

Figura 2.1 - Relação entre a complexidade e a precisão do modelo [Ross – 95]

A precisão não é o ponto forte da modelagem “fuzzy”. Todos os três métodos de modelagem são aplicáveis, a escolha dependerá das necessidades da aplicação. Se for

necessária grande precisão, a modelagem matemática é indispensável, apesar de custosa e possivelmente demorada para ser realizada. A experiência mostra que em muitos processos industriais, as tolerâncias dos parâmetros são grandes, o que permite o uso da modelagem "fuzzy".

A evidência de tais afirmações está no fato deste sistema de modelagem ser usado intensamente pela indústria japonesa, por exemplo [Ross - 95]:

- Sanyo, Fisher e outros fabricantes de câmeras para filmagem aplicam a lógica "fuzzy" para fazer o ajuste do foco e estabilizar as imagens de suas filmadoras;
- Mitsubishi utiliza lógica "fuzzy" em seus aparelhos de ar condicionado para ajuste da temperatura ambiente;
- Matsushita aplica lógica "fuzzy" em suas máquinas de lavar roupa, que combinado com sensores adequados, que detectam a cor e o tipo de roupa presente, escolhe a melhor combinação entre as 600 possíveis que envolvem a temperatura da água, quantidade de detergente e o ciclo de lavagem;
- Cidade de Sendai no Japão tem 16 estações do metrô que são controladas por um computador "fuzzy". As viagens se tornam tão suaves que os viajantes não precisam segurar nas cintas, e o controlador "fuzzy" comete 70% menos erros que o controlador humano;
- Nyssan introduziu a lógica "fuzzy" na transmissão automática;
- Outras empresas vêm empregando a lógica "fuzzy" em aparelhos domésticos, tais como: panelas de arroz, torradeiras, aspiradores de pó e outros.

O termo "fuzzy", que significa "nebuloso, vago ou impreciso", na nossa cultura, tem uma conotação negativa o que dificulta sua introdução no meio industrial.

3. LÓGICA “FUZZY”

A lógica “fuzzy” desenvolvida pelo professor Lotfi A. Zadeh [Zadeh - 65], na Universidade de Berkeley, Califórnia, é um meio de transformar as informações vagas, imprecisas e/ou qualitativas, em valores numéricos. Conforme ele menciona em seu artigo [Zadeh – 84]: “As bases matemáticas, propriamente ditas, dos conjuntos “fuzzy” não são em si mesmas “fuzzy”“, onde se depreende que a base matemática da teoria "fuzzy" é lógica e precisa.

Esta lógica é recomendada para uso em sistemas que têm seu modelo desconhecido ou apenas qualitativo e em que a modelagem matemática é de difícil determinação. É igualmente recomendada quando os modelos são não-lineares [Shaw & Simões – 99].

3.1. Matemática “fuzzy”

Foi desenvolvido um ferramental matemático, baseado nos conceitos de lógica clássica, para tratar informações imprecisas ou vagas. No apêndice são apresentados os conceitos de conjuntos e lógica “fuzzy” suficientes para o entendimento deste trabalho. Indicam-se as referencias [Zimmermann – 96], [Pedrycz – 92], [Ross – 95], [Cox – 95] e [Arbex – 96] para um aprofundamento no assunto.

3.2. Descrição Lingüística e Formas Analíticas

3.2.1. Definições

A base do conhecimento consiste de sentenças que são expressas de acordo com a sintaxe da linguagem de representação. A seguir algumas definições úteis [Russell & Norvig – 04]:

Sintaxe é a forma pela qual se representa as sentenças que por sua vez constituem a base do conhecimento. Ela especifica todas as sentenças que são bem-formadas, por exemplo, na aritmética comum, uma sentença bem formada pode ser representada por x + y = 4.

Semântica traduz o significado das sentenças, por exemplo, a semântica da linguagem define se a sentença x + y = 4 é verdadeira ou falsa, posto que em lógica não se tenha uma posição intermediária, já em lógica "fuzzy" é permitido um grau de verdadeiro ou falso.

Sentenças são, portanto, expressas de acordo com a sintaxe da linguagem de representação e cujo significado é determinado pela semântica.

Conseqüência lógica é quando uma ação ou sentença leva a uma conclusão ou outra sentença de forma lógica. Podemos dizer que, sendo a sentença A pertencente a um modelo e que A é verdadeiro, a sentença B será verdadeira como conseqüência lógica de A. Esta conseqüência lógica é representada por $A \models B$ que significa “se e somente se, em todo modelo no qual A é verdadeiro, então B também é verdadeiro”.

Inferência lógica são conclusões que se pode tirar de uma determinada conseqüência lógica. Algo como todas as possibilidades verdadeiras possíveis dado uma verdade.

3.2.2. Descrição da Linguagem "fuzzy"

A representação formal das sentenças "fuzzy" é feita através das regras "fuzzy" “if/then” aqui denominadas por regras SE/ENTÃO. Ela permite modelar o sistema através da linguagem informal do especialista. Apesar deste tipo de linguagem ser nebulosa e difusa, ela tem um fundamento matemático rigoroso envolvendo os conjuntos "fuzzy" [Zadeh - 88].

Na parte SE da linguagem tem-se o conjunto de condições que são satisfeitas, e é chamado de antecedente.

Na parte ENTÃO da linguagem tem-se o conjunto que pode ser inferido, chamada de conseqüente.

A coleção de regras formada por SE/ENTÃO são conectadas por “ELSE” aqui denominado TAMBÉM.

Esta coleção forma o algoritmo "fuzzy".

Assim na descrição lingüística têm-se duas formas de representação [Tsoukalas & Uhrig – 97]:

Forma Analítica

Forma Analítica
- Conjuntos "Fuzzy";
- Relações "fuzzy";
- Operadores de implicação;
- Composição

Forma Lingüística
- Variáveis;
- Proposições;
- Regras SE/ENTÃO;
- Algoritmos;
- Inferência

A forma lingüística representa a maneira humana de se comunicar e por trás temos a forma analítica que envolve as operações com os conjuntos "fuzzy".

3.2.3. Variáveis e Valores Lingüísticos

A variável lingüística é formada de valores lingüísticos. Tomando como exemplo a figura A2 do Apêndice, a variável lingüística é a Temperatura e os valores lingüísticos são: B – baixa, M – média e A – alta. Os valores são descritos pelos conjuntos "fuzzy" dado pelas funções de pertinência. Formalmente, a variável lingüística é caracterizada por uma quíntupla [Zadeh – 75] e [Tanscheit – 04]:

- x – nome da variável lingüística (temperatura, pressão, velocidade, etc.);
- T(x) – é o conjunto "fuzzy" de valores lingüísticos (baixa, média, alta, etc.);
- X – universo de discurso (0 a 100 ºC, 1 a 10 atm, 10 a 100 km/h, etc.);
- G – regra sintática para a geração dos valores de x como uma composição de termos de T(x), conectivos lógicos, modificadores e delimitadores (temperatura *não muito* baixa, pressão *não muito* alta, etc.);
- M – regra semântica que associa a cada valor gerado por G um significado.

No caso do exemplo Apêndice Figura A.2, tem-se:

- x – temperatura;
- T(x) – {baixa, média, alta};
- X – (-10) a (+40) ºC;
- G – temperatura *não muito* baixa *e* *não muito* alta (não foi utilizado no exemplo);
- M – associa o valor "fuzzy", por exemplo, gerado por G, a um conjunto "fuzzy" cuja função de pertinência exprime o seu significado.

O exemplo a seguir caracteriza os elementos das regras "fuzzy", que são relações "fuzzy" $R_i(x,y)$, denominadas relações de implicação "fuzzy" que pode ser visto no Apêndice item 6:

- SE temperatura é *media* E a massa é *grande* ENTÃO a velocidade é baixa, TAMBÉM;
- SE temperatura é *media* E a massa é *pequena* ENTÃO a velocidade é *não muito alta* E *não muito baixa*, TAMBÉM;
- ...

Onde se denomina por:

Variáveis lingüísticas = *média, não muito alta e não muito baixa,* etc.*;*

Proposições "fuzzy" = temperatura é média, velocidade é baixa, etc.;

Conectivos = E, ENTÃO;

Algoritmo "fuzzy" = coleção de regras SE/ENTÃO.

O conectivo ENTÃO pode ser modelado por uma T norma ou S norma (vide Apêndice itens 2.1. e 2.2.) dependendo da relação de implicação das regras "fuzzy" como veremos mais adiante.

3.3. Inferência "fuzzy"

Na descrição convencional (Apêndice Figura A5) avalia-se a função aplicando uma entrada "crisp" na entrada de $f(x)$ e se obtém um único valor "crisp" y como saída. O processo para se avaliar uma descrição lingüística "fuzzy" é chamado de inferência "fuzzy", também conhecida por implicação "fuzzy". Existem duas regras de inferência denominadas Modus Ponens Generalizado (GMP) e Modus Tollens Generalizado (GMT), do Latim Modus Ponens significa modo afirmativo e Modus Tollens significa modo de negação. Estas regras têm origem no campo da lógica e raciocínio aproximado [Russel & Norvig – 04].

GMP – Modus Ponens Generalizado

Premissa 1: SE x = A ENTÃO y = B

Premissa 2: x = A’

Conseqüência: y = B’

GMP relaciona-se com o mecanismo de inferência progressiva usado em controladores "fuzzy" e sistemas especialistas. Quando A’=A e B’=B, GMP reduz-se ao procedimento de inferência da lógica clássica conhecida como Modus Ponens (MP).

GMT – Modus Tollens Generalizado

Premissa 1: SE x = A ENTÃO y = B

Premissa 2: y = B’

Conseqüência: x = A’

GMT relaciona-se com o mecanismo de inferência regressiva usado em sistemas especialistas. Sistemas especialistas que usam GMT geralmente empregam um grande número de regras, centenas ou milhares, que é muito maior que os controladores que usam GMP, onde o número de regras varia tipicamente entre 10 a 100 regras. Quando A’= “negação de A” e B’=“negação de B”, GMT reduz-se ao procedimento de inferência da lógica clássica conhecida como Modus Tollens (MT).

Analiticamente GMP é realizado pela composição A’ com a relação de implicação $R(x, y)$ como uma composição de max-estrela (vede Apêndice item 6.2.2.).

$$B' = A' \circ R_{A \cdot B}(x, y) \qquad (3.1)$$

Em termos da função de pertinência a equação anterior é escrita, conforme visto no Apêndice item 6.2.1 equação A.30, como:

$$\mu_{B'}(y) = \bigvee_x [\mu_{A'}(x) \wedge \mu(x, y)] \qquad (3.2)$$

Utilizando-se do exemplo apresentado no Apêndice item 6 equação A.23, considerando A’=[0.1, 0.3, 0.0, 0.1, 0.8] e utilizando-se do operador mín no lugar da estrela,

ficando a composição (°) max-min, tem-se:

$$B' = A' \circ R_{A \bullet B}(x, y) = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.3 & 0 & 0.1 & 0.8 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} 0 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0.4 & 0.3 \\ 0 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \\ 0 & 0.5 & 0.8 & 0.4 & 0.3 \\ 0 & 0.5 & 1.0 & 0.4 & 0.3 \end{bmatrix} \qquad (3.3)$$

Onde os elementos de B' são calculados, por exemplo, da seguinte forma:

$$B'_2 = \max\left[0.1 \wedge 0.1,\ 0.3 \wedge 0.5,\ 0.0 \wedge 0.2,\ 0.1 \wedge 0.5,\ 0.8 \wedge 0.5\right] = 0.5$$

$$B' = \begin{bmatrix} 0 & 0.5 & 0.8 & 0.4 & 0.3 \end{bmatrix} \qquad (3.4)$$

3.4. Relações de Implicação

As regras SE/ENTÃO são declarações condicionais que descrevem a dependência de uma ou mais variáveis lingüísticas entre si. A forma analítica que está por trás é a relação "fuzzy" denominada “relação de implicação”. Estas relações são obtidas através de operadores de implicação "fuzzy" (ϕ). Os antecedentes e os conseqüentes das regras SE/ENTÃO são entradas de ϕ, e sua saída uma relação de implicação. A escolha do operador de implicação ϕ é de suma importância no processo de descrição lingüística e dependem de considerações lógicas e intuitivas. A tabela 1 apresenta os operadores mais comuns usados em aplicações de engenharia.

Tabela 1 – Alguns operadores de implicação "fuzzy" [Tsoukalas & Uhrig – 97]

Nome	**Operador de Implicação ϕ** $\phi[\mu_A(x), \mu_B(x)]$
ϕ_m –Max-Min de Zadeh	$(\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)) \vee (1-\mu_A(x))$
ϕ_c – Mínimo de Mamdani	$(\mu_A(x) \wedge \mu_B(y))$
ϕ_p – Produto de Larsen	$(\mu_A(x) \bullet \mu_B(y))$
ϕ_a – Aritmético	$1 \wedge (1-\mu_A(x)+\mu_B(y))$
ϕ_b – Boleana	$((1-\mu_A(x)) \vee \mu_B(y))$
ϕ_{dp} – Produto Drástico	$\mu_A(x), \quad se \quad \mu_B(y)=1$ $\mu_B(x), \quad se \quad \mu_A(y)=1$ $0, \quad se \quad \mu_A(y)<1, \quad \mu_B(y)<1$

Portanto, dado uma regra:

$$SE\ x = A\ ENTÃO\ y = B \qquad (3.5)$$

A forma analítica por trás da regra, é a relação de implicação que para sistemas contínuos é dada por:

$$R(x,y) = \int_{x,y} \mu(x,y)/(x,y) \qquad (3.6)$$

E para sistemas discretos é dada por

$$R(x,y) = \sum_{x,y} \mu(x,y)/(x,y) \qquad (3.7)$$

Exemplo do uso da implicação min de Mamdani. Neste caso utilizou-se o GMP para avaliar a descrição lingüística com uma única regra SE/ENTÃO. Considera-se $\mu_A(x)$ a função de pertinência do antecedente, $\mu_B(y)$ a função de pertinência do conseqüente e o número "fuzzy" A' (um "singleton") dados pela Figura 3.1a a 3.1c.

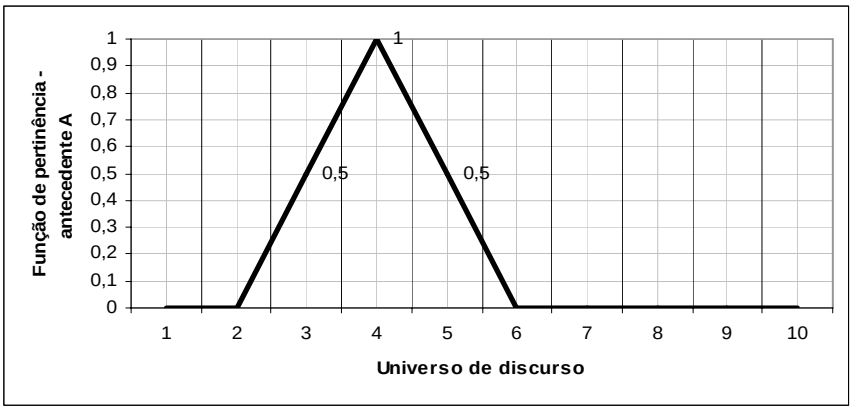

Figura 3.1a - Gráfico do antecedente A da regra de inferência (premissa 1 do GMP)

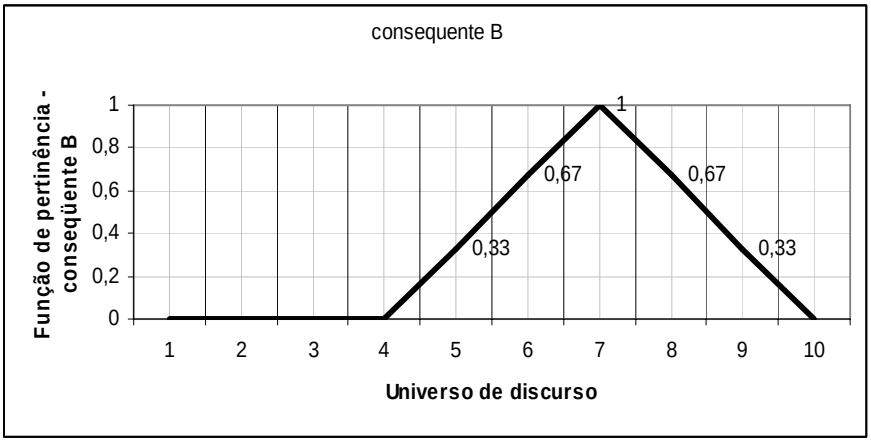

Figura 3.1b - Gráfico do conseqüente B da regra de inferência (premissa 1 do GMP)

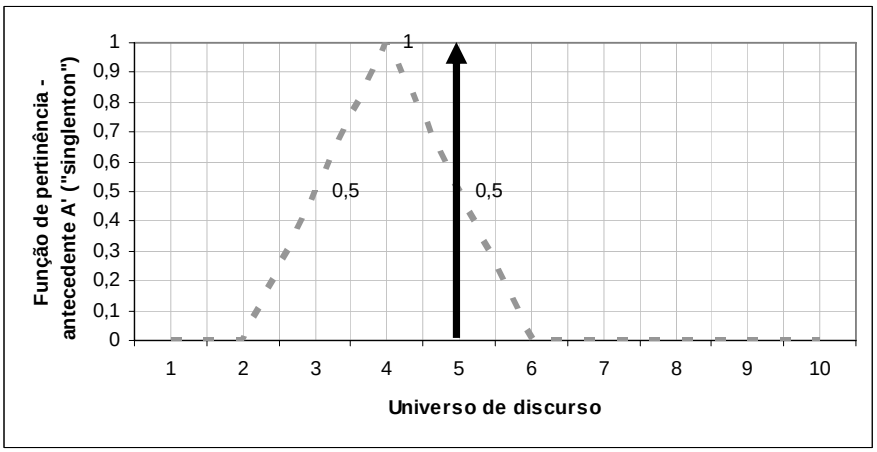

Figura 3.1c - Gráfico do conjunto (“singleton”) de entrada A’ (premissa 2 do GMP)

Das Figuras 3.1a a 3.1c tiram-se os conjuntos:

$$A = \sum_{i=0}^{10} \mu_A(x_i)/(x_i) = 0{,}5/3 + 1{,}0/4 + 0{,}5/5 \qquad (3.8)$$

$$B = \sum_{i=0}^{10} \mu_B(y_i)/(y_i) = 0{,}33/5 + 0{,}67/6 + 1{,}0/7 + 0{,}67/8 + 0{,}33/9 \qquad (3.9)$$

$$A' = \sum_{i=0}^{10} \mu_{A'}(x_i)/(x_i) = 1{,}0/5 \qquad (3.10)$$

Calcula-se a função de pertinência $\mu(x_i, y_j)$ da relação de implicação $R(x_i, y_j)$ que analiticamente descreve a regra usando um determinado operador ϕ de implicação. Para este exemplo escolheu-se, na Tabela 1 , o operador ϕ_c mínimo de Mamdani.

$$\mu(x_i, y_j) = \phi_c\left[\mu_A(x_i),\ \mu_B(y_j)\right] = \mu_A(x_i) \wedge \mu_B(y_j) \qquad (3.11)$$

Pela relação de implicação dada pela equação A.21 e tendo a função de pertinência calculada utilizando a equação 3.11, tem-se:

$$\begin{aligned} R_{A\bullet B} = \sum_{(x_i, y_i)} \mu(x_i, y_j)/(x_i, y_j) = {} & 0{,}33/(3,5) + 0{,}5/(3,6) + 0{,}5/(3,7) + \\ & 0{,}5/(3,8) + 0{,}33/(3,9) + 0{,}33/(4,5) + 0{,}67/(4,6) + 1{,}0/(4,7) + \\ & 0{,}67/(4,8) + 0{,}33/(4,9) + 0{,}33/(5,5) + 0{,}5/(5,6) + 0{,}5/(5,7) + \\ & 0{,}5/(5,8) + 0{,}33/(5,9) \end{aligned} \qquad (3.12)$$

Com o intuito de facilitar o entendimento da relação dada pela equação 3.12, representa-se a relação em forma matricial, vide Tabela 2.

Tabela 2 – Representação da relação $R_{A\bullet B}$

$$x\left\{\overbrace{\begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.33 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.33 & 0.67 & 1.0 & 0.67 & 0.33 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.33 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.33 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}}^{y}\right.$$

Para determinar B', faz-se a composição entre A' e a relação $R_{A \cdot B}$, conforme a equação 3.13:

$$B'(y_j) = A'(x_i) \circ R_{A \bullet B}(x_i, y_j) = [0 \quad 0 \quad 1] \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.33 \\ 0.33 & 0.67 & 1.0 & 0.67 & 0.33 \\ 0.33 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.33 \end{bmatrix} \qquad (3.13)$$

E da equação 3.2, calcula-se a função de pertinência de B':

$$\begin{aligned}
&\mu_{B'}(y) = \bigvee_x [\mu_{A'}(x) \wedge \mu(x, y)] \\
&\mu_{B'}(5) = \bigvee_x [0 \wedge 0,\ 0 \wedge 0.33,\ 1 \wedge 0.33] = \bigvee_x [0,\ 0,\ 0.33] = 0.33 \\
&\mu_{B'}(6) = \bigvee_x [0 \wedge 0,\ 0 \wedge 0.67,\ 1 \wedge 0.5] = \bigvee_x [0,\ 0,\ 0.5] = 0.5 \\
&\mu_{B'}(7) = \bigvee_x [0 \wedge 0,\ 0 \wedge 1,\ 1 \wedge 0.5] = \bigvee_x [0,\ 0,\ 0.5] = 0.5 \\
&\mu_{B'}(8) = \bigvee_x [0 \wedge 0.5,\ 0 \wedge 0.67,\ 1 \wedge 0.5] = \bigvee_x [0,\ 0,\ 0.5] = 0.5 \\
&\mu_{B'}(9) = \bigvee_x [0 \wedge 0.33,\ 0 \wedge 0.33,\ 1 \wedge 0.33] = \bigvee_x [0,\ 0,\ 0.33] = 0{,}33
\end{aligned} \qquad (3.14)$$

Com isto pode-se escrever B' como sendo:

$$B'(y_j) = 0.33/5 + 0.5/6 + 0.5/7 + 0.5/8 + 0.33/9 \qquad (3.15)$$

Graficamente nota-se que B' é, basicamente, B cortado na altura em que A' cruza A.

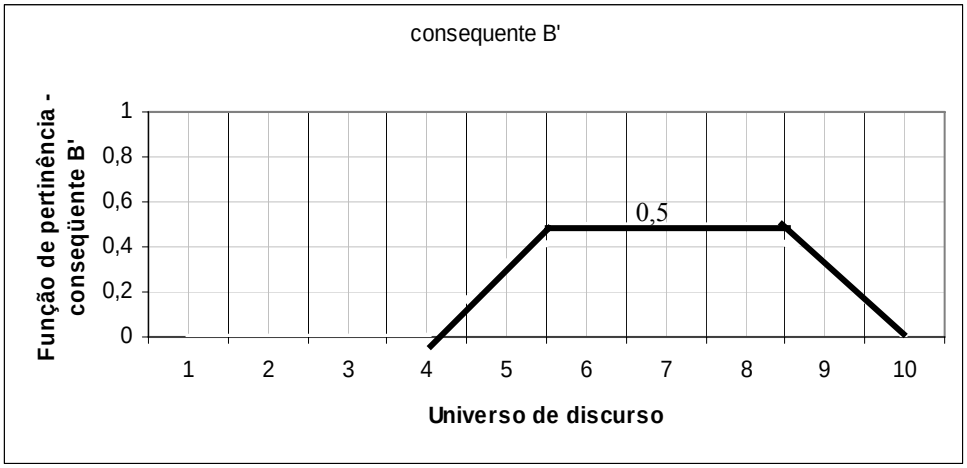

Figura 3.2 - Conjunto "fuzzy" B' resultado da descrição lingüística do exemplo apresentado pelas Figuras (3.1a) a (3.1c) (conseqüência do GMP)

Sempre que se usa o operador de implicação de Mamdani para modelar a relação de implicação envolvida em GMP, obtém-se um conseqüente limitado ou chanfrado ou ainda achatado, conforme mostra a Figura 3.2.

3.5. Algoritmos "fuzzy"

Um algoritmo "fuzzy" é um conjunto de regras SE/ENTÃO definidas no mesmo espaço de produto cartesiano conectadas pelo conectivo TAMBÉM que pode ser interpretado como união ou intersecção, dependendo do operador de implicação utilizado. A Tabela 3 mostra alguns exemplos de interpretação do conectivo TAMBÉM para os operadores mais utilizados.

Tabela 3 – Interpretação para o conectivo TAMBÉM em função do operador de implicação ($\vee$ → união e $\wedge$ → intersecção)

Operador de Implicação	Interpretação para TAMBÉM
ϕ_m –Max-Min de Zadeh	"AND" ou E →($\wedge$)
ϕ_c – Mínimo de Mamdani	"OR" ou OU → ($\vee$)
ϕ_p – Produto de Larsen	"OR" ou OU → ($\vee$)
ϕ_a – Aritmético	"AND" ou E →($\wedge$)
ϕ_b – Boleana	"AND" ou E →($\wedge$)
ϕ_{dp} – Produto Drático	"OR" ou OU → ($\vee$)

Portanto, dado um valor "fuzzy" A' e B', através do GMP determina-se C' como:

$$
\begin{array}{l}
SE\ x\ é\ A_1\ E\ y\ é\ B_1\ ENTÃO\ w\ é\ C_1\quad TAMBÉM \\
SE\ x\ é\ A_2\ E\ y\ é\ B_2\ ENTÃO\ w\ é\ C_2\quad TAMBÉM \\
\ldots \\
SE\ x\ é\ A_n\ E\ y\ é\ B_n\ ENTÃO\ w\ é\ C_n \\
\quad x\ é\ A'\ E\ y\ é\ B' \\
\hline
\quad w\ é\ C'
\end{array}
\qquad (3.16)
$$

Graficamente pode-se representar o algoritmo da equação 3.16, considerando as entradas como valores “crisp” x_0=A’ e y_0=B’, conforme mostrado na Figura 3.3:

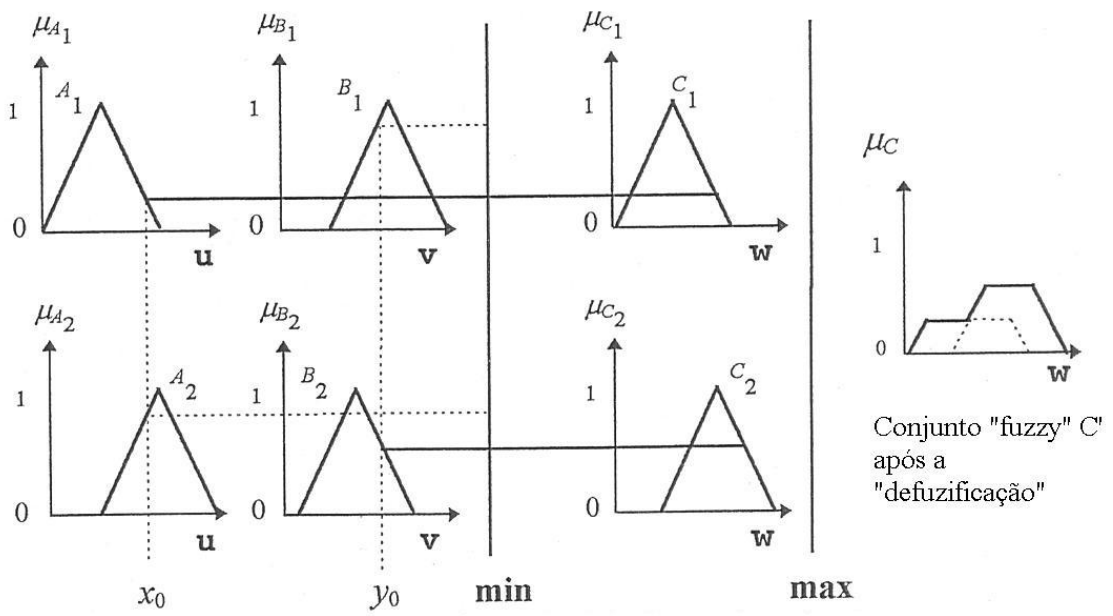

Figura 3.3 - Algoritmo "fuzzy" utilizando o mínimo de Mamdani

3.6. “Defuzificação”

O processo de “defuzificação” consiste em transformar o valor da variável lingüística de saída, inferida pelo algoritmo "fuzzy", em um valor discreto. Existem vários métodos de “defuzificação” [Pedrycz – 93] que podem ter um impacto significativo na velocidade e precisão do sistema.

A seguir descrevem-se os 3 métodos mais utilizados.

3.6.1. “Defuzificação” centro de área (COA)

É o método mais utilizado, também conhecido por centro de gravidade, pois baseia-se no cálculo do centróide da área resultante da distribuição de possibilidades. O

centróide da área é calculado como:

$$w^* = \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i \mu_c(w_i)}{\sum_{i=1}^{N} \mu_c(w_i)} \qquad (3.17)$$

O valor “crisp” w* é tirado do centro geométrico do valor "fuzzy" de saída μ_c (w), sendo este formado pela união de todas as regras constituintes do algoritmo "fuzzy", conforme visto na Figura 3.3. O COA é o ponto que separa a área sob a curva μ_c (w) em duas partes iguais. A equação 3.17 representa a somatória calculada sobre os valores discretos w_i amostrados do universo de discurso em “N“ pontos. Este método não leva em conta a sobreposição de áreas, o que pode vir a ser uma fonte de imprecisão.

3.6.2. “Defuzificação” centro do máximo (COM)

Neste caso tomam-se os valores dos picos das funções de pertinência que compõem a saída μ_c (w), o que acaba levando em conta a contribuição de todas as regras por inteiro, isto evita a deficiência do modelo anterior. A saída é calculada como:

$$w^* = \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i \times \sum_{k=1}^{n} \mu_{c,k}(w_i)}{\sum_{i=1}^{N} \sum_{k=1}^{n} \mu_{c,k}(w_i)} \qquad (3.18)$$

3.6.3. “Defuzificação” média do máximo (MOM)

O método do máximo é uma maneira simples de se fazer a “defuzificação”. Toma-se o valor médio de todas as saídas das regras cujas funções de pertinência assumem o valor “crisp” máximo.

$$w^* = \sum_{m=1}^{M} \frac{w_m}{M} \qquad (3,19)$$

Sendo w_m o m-ésimo elemento no universo de discurso onde a função de pertinência μ_c (w) é máxima e M é o número total desses elementos.

4. O PROCESSO DE TÊMPERA

4.1. O Ferro

Antes de caracterizar os aços é conveniente entender as transformações do ferro com a variação de temperatura. O ferro sólido apresenta seus átomos ordenados nas três direções do espaço com distâncias fixas entre si, formando uma rede espacial regular, ou seja, cristalina. A Tabela 4 apresenta a transformação do ferro sólido a partir da temperatura ambiente até seu ponto de vaporização, onde temos uma mudança na sua estrutura cristalina ora para cúbica de corpo centrado (CCC) ora para cúbica de face centrada (CFC). A morfologia das estruturas é mostrada pelas Figuras 4.1 e 4.2.

Tabela 4 – Transformação de fase do ferro em relação a temperatura

Temperatura	Fase	Estrutura	Estado
T < 770 ºC	α (ferrita)	CCC	Sólido Ferromagnético
770 ºC≤T < 912 ºC	α (ferrita)	CCC	Sólido Não-ferromagnético
912 ºC ≤T < 1394 ºC	γ (austenita)	CFC	Sólido
1394 ºC≤ T < 1538 ºC	δ (ferrita)	CCC	Sólido
1538 ºC≤ T < 2875 ºC			Líquido
T ≥ 2875 ºC			Vapor

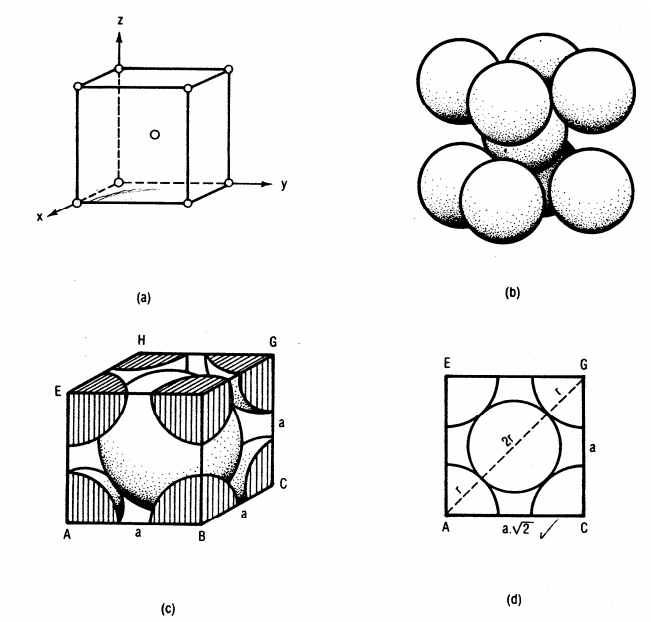

Figura 4.1 - Estrutura cúbica de corpo centrado (CCC); (a) representação esquemática, (b) vista tridimensional, (c) célula unitária e (d) plano diagonal da célula unitária. Referência [Silva & Mei – 88]

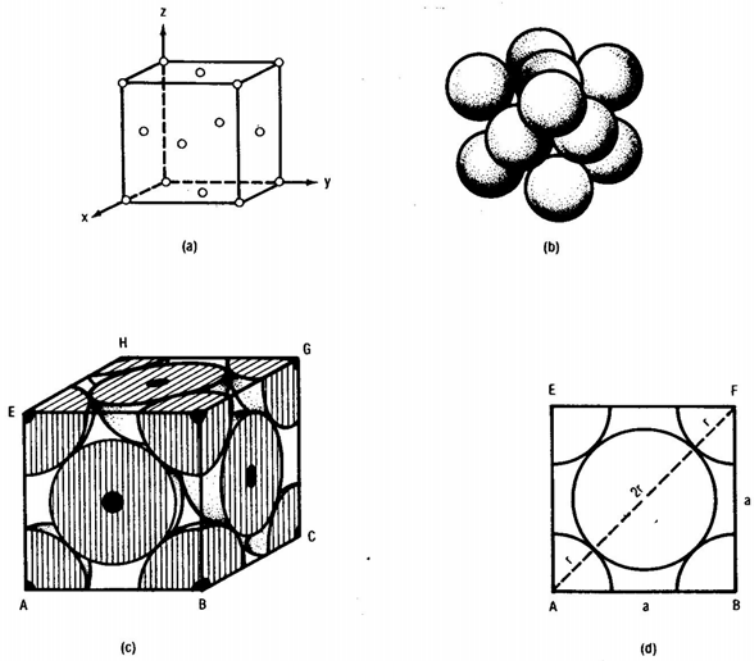

Figura 4.2 - Estrutura cúbica de face centrada (CFC) ; (a) representação esquemática, (b) vista tridimensional, (c) célula unitária e (d) plano da face da célula unitária. Referência [Silva & Mei – 88]

Geometricamente pode-se calcular a aresta “a” em função do raio “r” do átomo.

Para CCC temos:

$$a = \frac{4r}{\sqrt{3}} \qquad (4.1)$$

Para CFC temos:

$$a = \frac{4r}{\sqrt{2}} \qquad (4.2)$$

Com o aumento de temperatura a aresta “a” aumenta.

Para se calcular a porcentagem do volume da célula que é ocupada pelos átomos, define-se o fator de empacotamento (FE):

$$FE = \frac{(n^o \text{ de átomos inteiros dentro da célula})(\text{volume do átomo})}{(\text{volume da célula} = a^3)} \qquad (4.3)$$

Sendo que o volume do átomo é igual a $(4/3) \quad \pi \quad r^3$

Temos para as duas estruturas os seguintes FE:

$$\begin{aligned} &\text{para CCC} \rightarrow FE = 0{,}68 \\ &\text{para CFC} \rightarrow FE = 0{,}74 \end{aligned} \qquad (4.4)$$

Nota-se que a estrutura CFC é mais densa, pois os átomos ocupam 74% do volume da célula.

4.2. O Aço

Para que ocorra a mistura de dois metais pela substituição do átomo de Fe pelo átomo do soluto (por exemplo; carbono, níquel, cromo, etc) é necessário que o átomo do soluto seja compatível eletroquimicamente e seu tamanho seja próximo do tamanho do átomo de Fe, ou seja, 0,125 nm +/- 15%, neste caso denomina-se solução sólida substitucional. Por outro lado, os átomos de soluto podem se alojar nos interstícios existentes entre os átomos de Fe, o que é chamado de solução sólida intersticial. Os interstícios da estrutura cristalina medem de 0,19 nm para estrutura CCC com interstício octaédrico, 0,36 NM para CCC e interstício tetraédrico, 0,53 nm para CFC e interstício octaédrico e 0,29 nm para CFC e interstício tetraédrico.

O carbono possui raio de 0,71 nm (a 15 ºC). Não é grande suficiente para substituir um átomo de ferro e é maior que o maior vão intersticial, limitando, portanto, a solubilidade intersticial deste no ferro.

O aço é portanto, uma solução sólida ferro-carbono contendo geralmente de 0,008% a 2,06% de carbono, além de alguns elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação [Callister – 02].

A Figura 4.3 apresenta o diagrama de fases ferro-cementita, onde cementita é um carboneto de ferro Fe_3C. Observa-se nesses diagramas a influência da temperatura sobre a solubilidade do carbono no ferro.

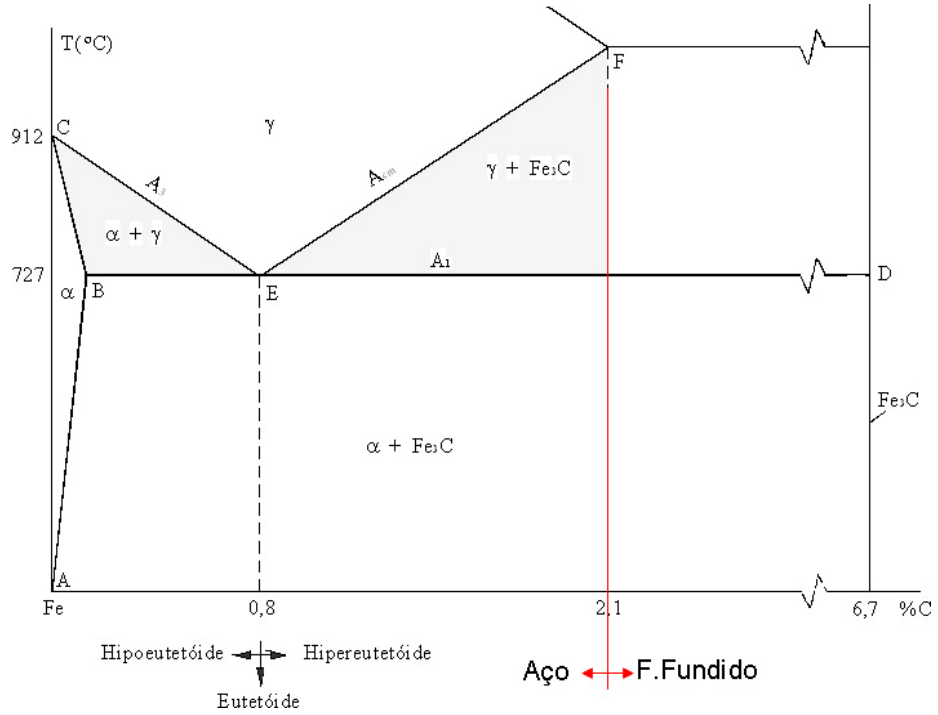

Figura 4.3 - Diagrama de fase ferro-cementita [Kolososki – 04]

Pode-se então caracterizar o aço:

- Ferrita (fase α), com estrutura CCC: estável até 912 ºC e a solubilidade do carbono chegam ao máximo a 0,0218% a 727 ºC. Na temperatura ambiente a solubilidade é de 0,008%, o que industrialmente é chamado de ferro puro;
- Austenita (fase γ), com estrutura CFC, estável entre 912 a 1495 ºC e a solubilidade do carbono chega no máximo a 2,11% a 1148 ºC. Esta faixa de carbono qualifica o chamado Aço. Acima desta qualifica-se o ferro fundido.
- Ferrita (fase δ) ,estrutura CCC, estável entre 1394 até 1538 ºC, a partir da qual o ferro liquefaz. A solubilidade do carbono cai para 0,09% a 1495 ºC.

Além do carbono utilizam-se outros elementos químicos para solubilizar com o ferro. O cromo (Cr) e o níquel (Ni) possuem raio atômico de ~1,25 nm, praticamente igual ao do ferro e portanto solubilizam no reticulado cristalino pela substituição do átomo de ferro, tem-se então os denominados aços ligados.

4.3. Perlita

No diagrama de fase ferro/cementita (Figura 4.3) notam-se as linhas designadas por A (do francês Arrêt) que indicam a ocorrência de uma parada na temperatura até que a transformação de fase se complete. Um ponto importante desse diagrama é o que ocorre a 727 ºC com 0,77% de carbono, chamado de eutetóide. Aços com concentração de C menor que 0,77% são chamados de hipoeutetóides e acima por hipereutetóides.

A estrutura do aço eutetóide, quando resfriada em condições de equilíbrio a partir do campo austenítico, é lamelar e denominada perlita. Para os aços hipoeutetóides tem-se uma mistura dos microconstituintes ferrita e perlita e para os aços hipereutetóides os microconstituintes cementita e perlita. A Figura 4.4 mostra a influência do teor de C na microestrutura do aço resfriado em condições de equilíbrio.

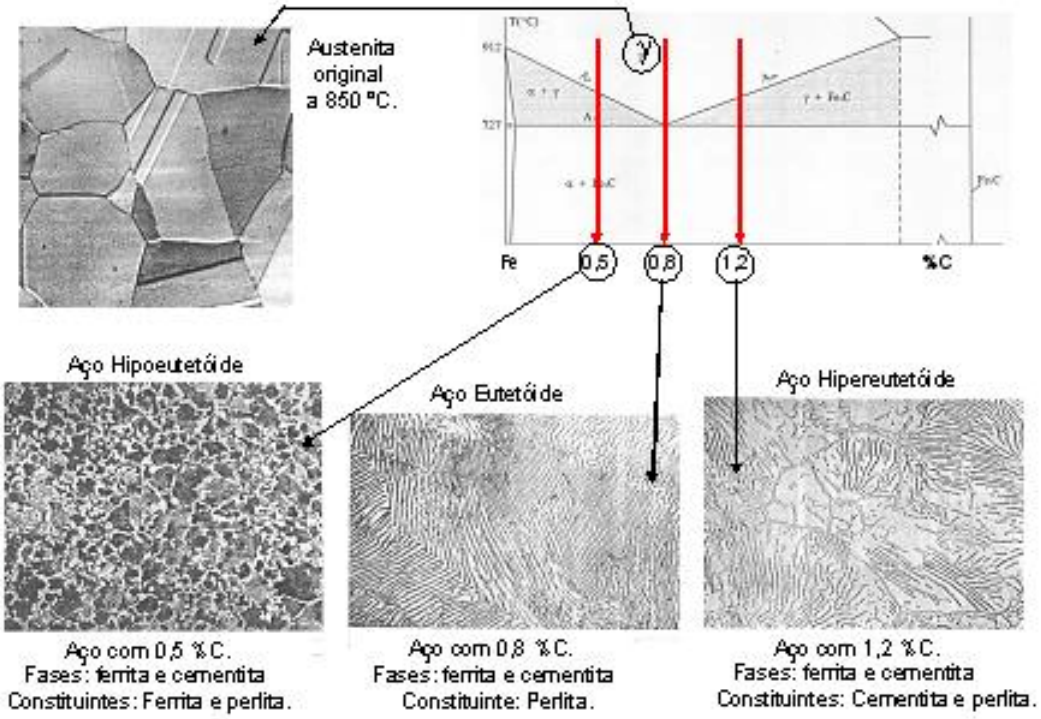

Figura 4.4 - Diagrama de fases ferro-cementita com indicação da respectiva estrutura [Kolososki – 04]

A Figura 4.5 mostra um exemplo da seqüência da transformação da estrutura de um aço hipoeutetóide à medida que este é resfriado.

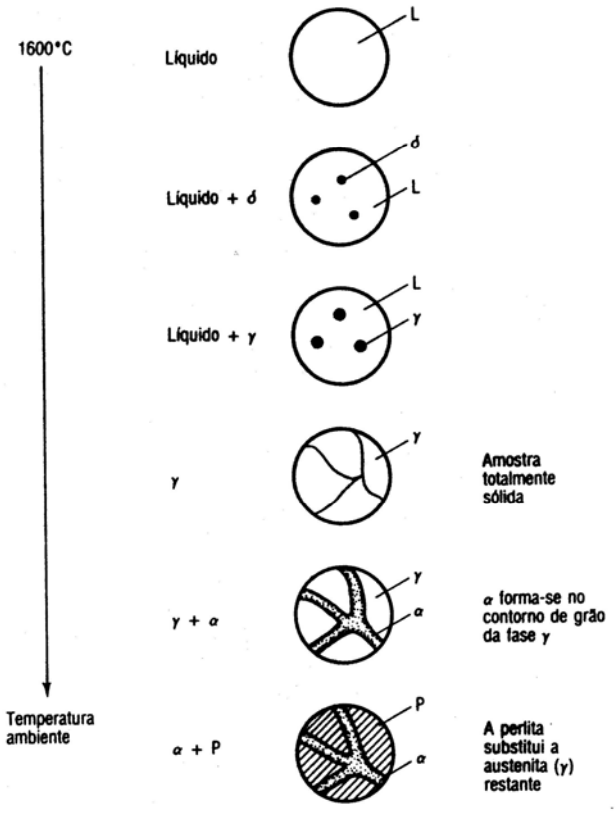

Figura 4.5 - Mudanças de fases durante o resfriamento de uma liga Fé-0,25%C [Silva & Mei – 88]

4.4. Diagrama de Transformação de Fase Isotérmica – Curvas TTT

O diagrama de fase ferro-cementita apresenta as transformações de fases do +.aço resfriado lentamente, ou seja, ferrita, perlita e cementita em função do teor de carbono. Se o resfriamento for rápido, que é o mais usual nos processos de industrialização do aço, têm-se outra constituintes como a bainita e a martensita que não aparecem neste diagrama. Os átomos carbono e ferro precisam de um tempo para que ocorra a difusão, ou seja, o deslocamento dos

átomos entre os "vazios" ou de interstício para interstício, pela rede cristalina, tanto no aquecimento quanto no resfriamento. A Figura 4.6 mostra a alteração da estrutura com o aumento da velocidade de resfriamento.

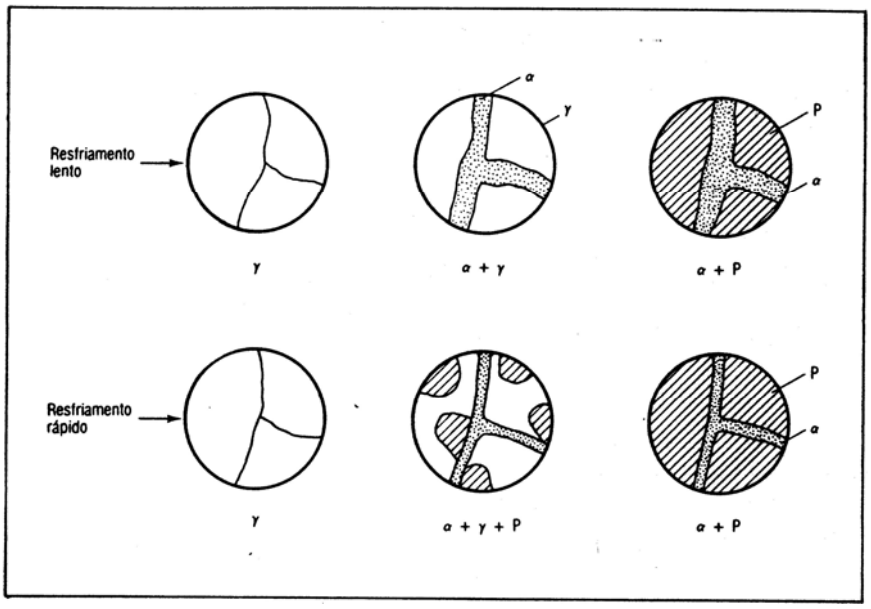

Figura 4.6 - Redução da fração volumétrica da ferrita com o aumento da taxa de resfriamento (^{o}C/min.) [Silva & Mei – 88]

Com o objetivo de acompanhar o efeito do resfriamento nos aços, construiu-se as curvas TTT – (tempo, temperatura, transformação), [Silva & Mei – 88]. A Figura 4.7 apresenta um esquema das curvas TTT, e a Figura 4.8 apresenta as curvas TTT para o aço SAE 1080 que é muito semelhante às do aço objeto deste trabalho.

Estas curvas mostram o comportamento da estrutura durante o resfriamento, o que permite escolher a velocidade de resfriamento mais adequada de forma a obter certas características finais do aço, tais como tenacidade e alongamento.

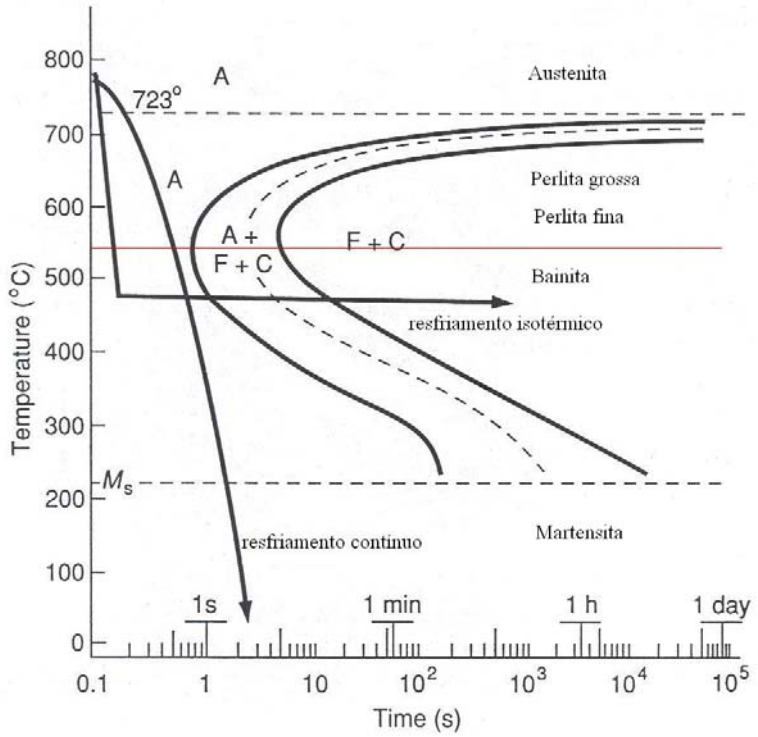

Figura 4.7 - Curva TTT esquemática [Scheer – 77]

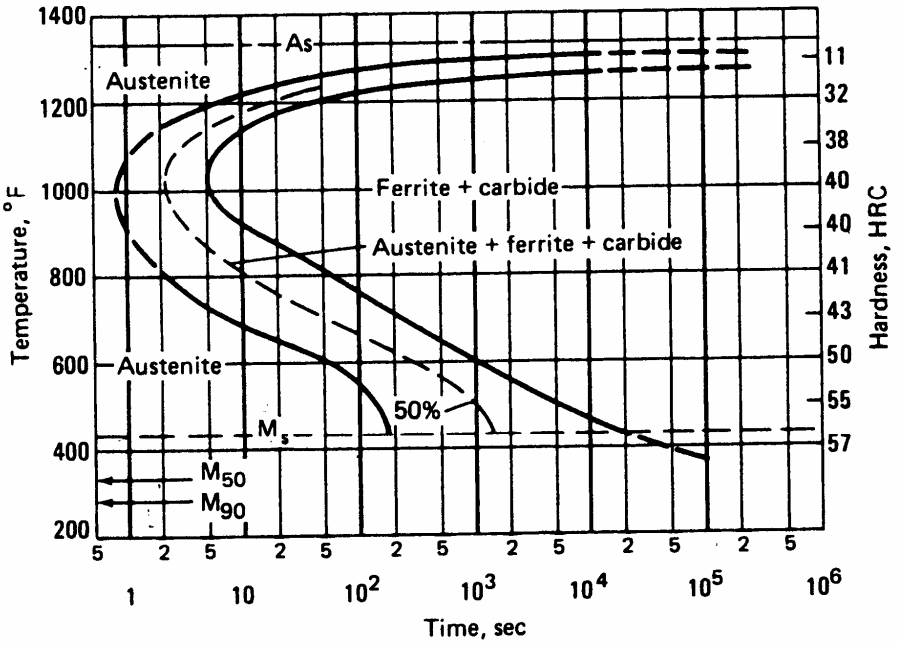

Figura 4.8 - Curva TTT aço SAE1080 com 0,79% C e 0,76% Mn. [ASM – 77]

4.5. Martensita

Conforme apresentado na Figura 4.7, a martensita é obtida com o resfriamento rápido partindo da austenita. É uma fase metaestável que ocorre por cisalhamento da estrutura sem difusão. A martensita é uma solução sólida supersaturada de carbono em ferro tetragonal de corpo centrado. Trata-se, portanto de uma forma distorcida do ferro cúbico de corpo centrado.

4.6. Têmpera

Define-se têmpera como o endurecimento através da austenitização com posterior resfriamento a uma taxa tal que uma quantidade substancial de austenita é transformada em martensita [ASM – 77]. Isto significa elevar a temperatura do aço acima da zona delimitada pelas linhas Ac_1 e Acm (ver Figura 4.3) por um tempo que garanta a austenitização completa, seguida de um resfriamento rápido suficiente para permitir a transformação para a estrutura martensita. Desta forma tem-se um aumento da dureza, do limite de escoamento, da resistência à tração, da resistência à compressão e do desgaste. Porém diminui-se a resistência ao choque, ao alongamento, a estricção e a ductilidade. A capacidade de aumentar a dureza está ligada com a quantidade de carbono, sendo que esta cresce com o aumento do teor de carbono.

Portanto os parâmetros básicos da têmpera são: a temperatura de austenitização, o tempo de exposição e a velocidade de resfriamento [Novikov – 94].

4.7. Diagrama de Transformação por Resfriamento Contínuo - TRC

Nas aplicações industriais, o tratamento térmico não é isotérmico, ou seja, o

resfriamento o resfriamento é feito de forma contínua durante a transformação de fase. As curvas TTT prevêem uma temperatura constante durante a transformação. Para representar graficamente esta situação, criou-se o diagrama de transformação por resfriamento contínuo – TRC, onde as curvas isotérmicas são deslocadas para tempos mais longos e para temperaturas menores, como está indicado na Figura 4.9..

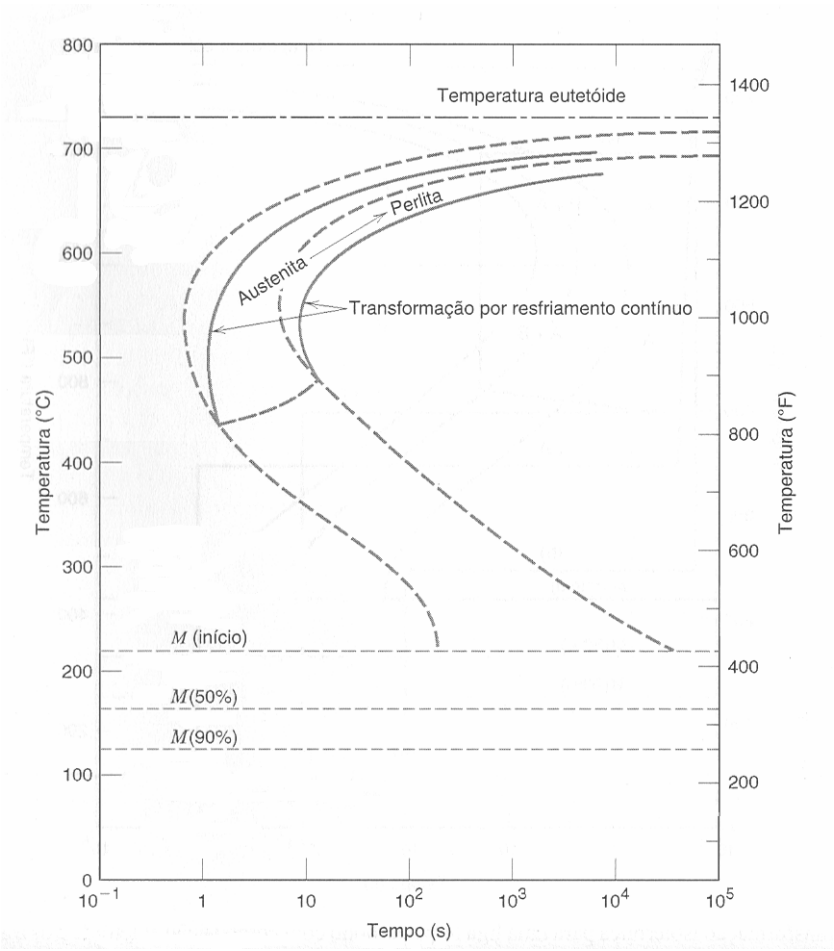

Figura 4.9 - Superposição dos diagramas de transformação isotérmica e transformação por resfriamento contínuo para o aço eutetóide. [Callister – 02]

A Figura 4.10 mostra as linhas de resfriamento e as respectivas durezas atingidas para o aço SAE 1070.

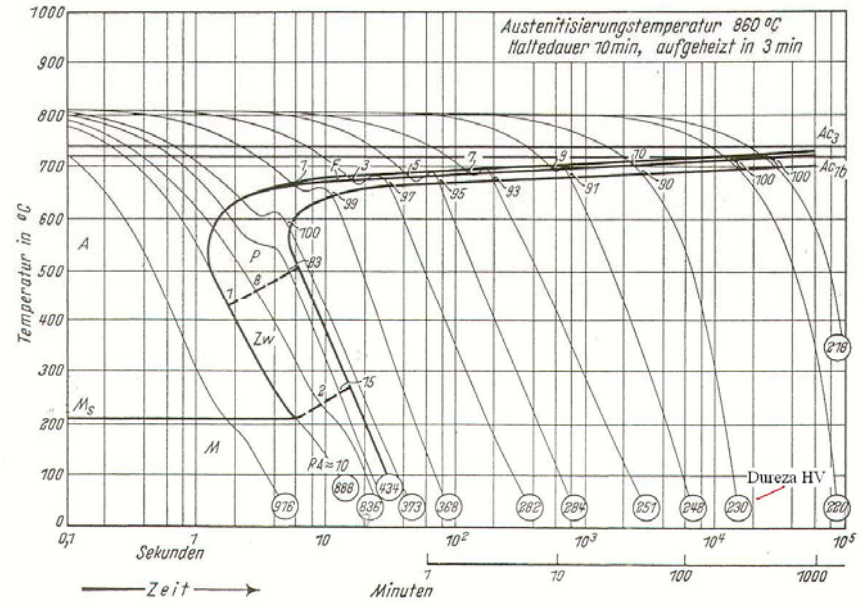

Figura 4.10 - Curva TRC aço 1070 com 0,76% C, 0,29% Mn com as linhas de resfriamento e respectivas durezas em HV representadas [Wever – 61]

4.8. Grão Austenítico

O tamanho do grão austenítico tem grande influência na temperabilidade do aço, quanto maior o grão maior a facilidade de se temperar o material, porém provoca uma deterioração nas propriedades mecânicas aumentando as dificuldades de conformação, estampabilidade e homogeneidade das propriedades mecânicas. Industrialmente costuma-se utilizar os elementos de liga para aumentar a temperabilidade ao invés do crescimento forçado do grão austenítico. O tamanho do grão austenítico é tabelado na norma ASTM E112, conforme mostrado na Figura 4.11, e na norma DIN 50 601.

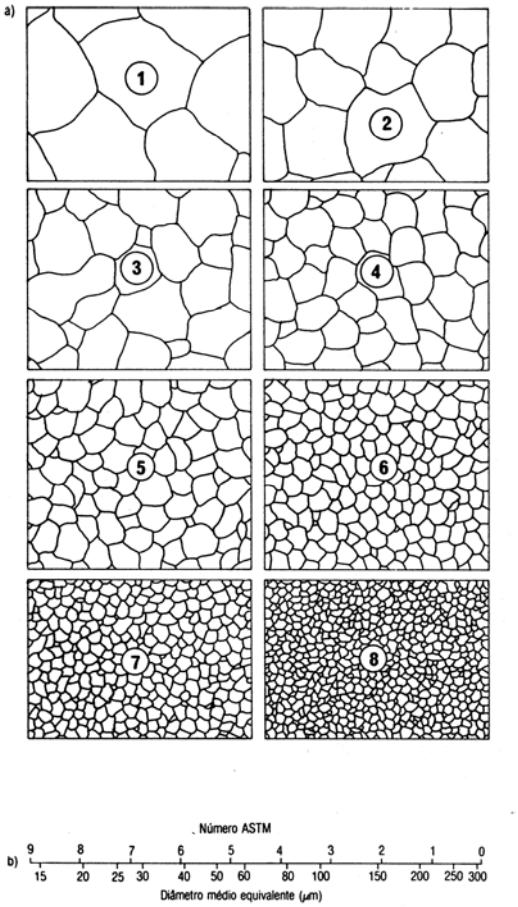

Figura 4.11 - Tamanho do grão austenítico pela ASTM (a) escala de conversão do número de grão ASTM em diâmetro médio equivalente (b) (figura fora de escala) [Silva & Mei – 88]

4.9. Ciclos de Resfriamento

O resfriamento deve ser rápido o suficiente para que a transformação se dê diretamente da fase austenita para a martensita, sem passar por outras fases, como a perlita ou bainita, e deve-se levar em consideração a espessura do material, isto é a diferença da velocidade de resfriamento entre a superfície e o núcleo.

O resfriamento com água é muito eficaz, ainda mais se for colocado sal para inibir o filme de vapor formado na superfície de resfriamento, o que diminui a condução de calor.

Porém pode causar empenamento ou trinca do material, posto que a taxa de resfriamento na superfície é muito maior que a do núcleo. Existem, portanto, outros meios de resfriamento mais amenos, tais como óleo, chumbo, banhos quentes com sais em fusão e ar comprimido. Além do elemento refrigerante, pode-se escalonar o resfriamento em patamares que ajudam a evitar os problemas de empenamento e trincas em detrimento da dureza. A seguir são apresentadas as formas mais utilizadas de escalonamento.

4.9.1. Martêmpera

Martêmpera é a forma de diminuir as tensões de resfriamento, ela interrompe o resfriamento por certo tempo a uma temperatura um pouco superior ao início da transformação da martensita, linha Ms nas Figuras 4.7 a 4.9., prosseguindo com o resfriamento até a temperatura ambiente. A Figura 4.12 mostra o esquema deste ciclo. A martêmpera permite uma melhor estabilidade dimensional ou seja homogeneização de temperatura entre núcleo e superfície.

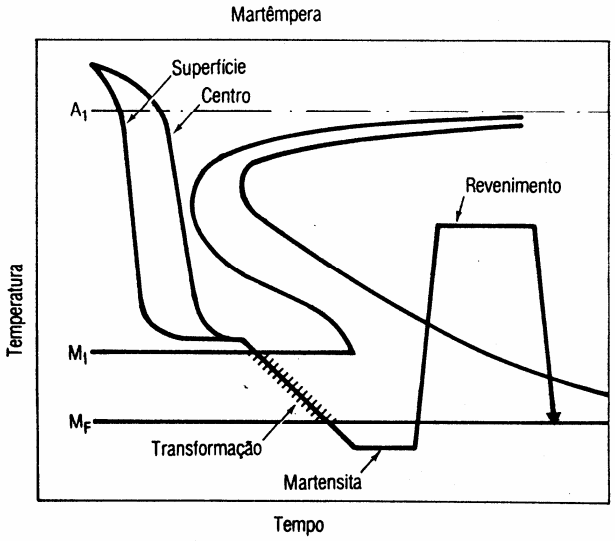

Figura 4.12 - Ciclo de revenimento para a martêmpera, levando em conta a espessura da peça [Silva & Mei – 88]

4.9.2. Austêmpera

A austêmpera produz um aço com um bom alongamento e resistente ao impacto sem redução significativa da dureza. Apropriado para aceitar conformações mecânicas sem perder o efeito mola, característica necessária para diversas aplicações industriais. A Figura 4.13 mostra o ciclo para obtenção da austêmpera.

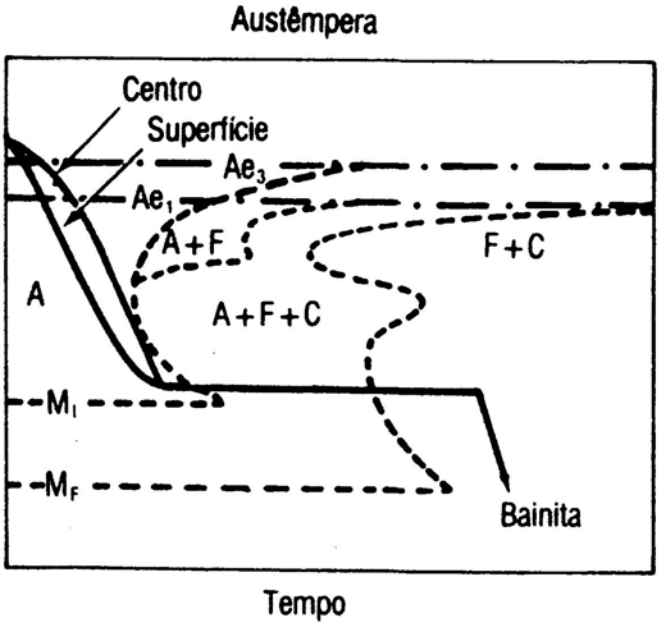

Figura 4.13 - Ciclo de revenimento para a austêmpera, levando em conta a espessura da peça [Silva & Mei – 88]

4.10. Revenimento

Quando se realiza a têmpera com água, o aço fica extremamente duro (~ 50 HRC) e, com baixa tenacidade, o que torna o material sem aplicação prática. Para melhorar a tenacidade, reaquece-se o aço de forma que o carbono começa a se movimentar e formar carbonetos Fe_3C. A formação dos carbonetos começa a partir dos 100 ºC e a partir de 350 ºC começa a formação da cementita Fe_3C. Como resultado do revenimento tem-se um decréscimo da tensão da rede cristalina com conseqüente diminuição da dureza, aumento da

tenacidade e uma mudança do volume do material. A Figura 4.14 mostra o esquema do ciclo de revenimento.

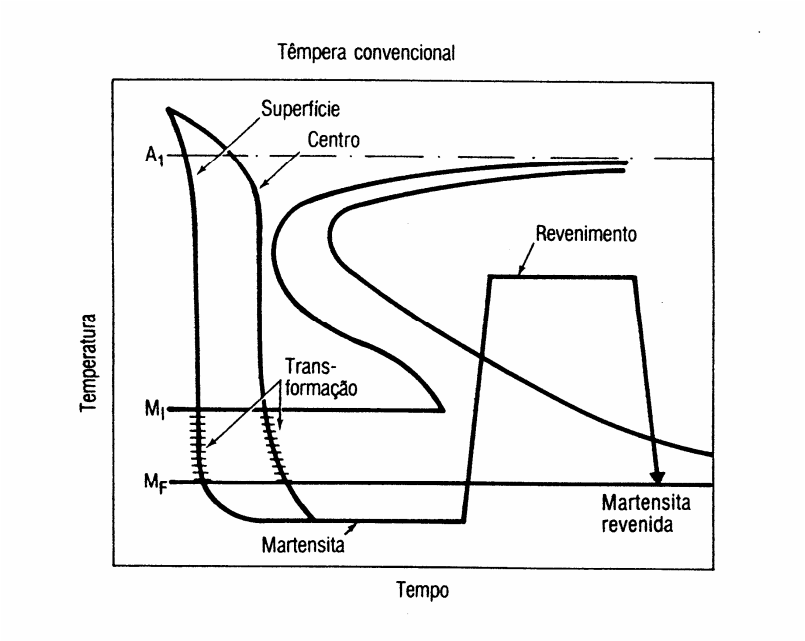

Figura 4.14 - Ciclo de revenimento para uma tempera convencional, levando em conta a espessura da peça [Silva & Mei – 88]

5. O FORNO DE TÊMPERA CONTÍNUA

Este processo não é muito comum no Brasil por exigir alto investimento para aquisição do forno, hoje estimado em R$10.000.000,00 (US$4.600.000), além da necessidade de um conhecimento técnico especializado para sua operação, conseguido através de muitos anos de experimentação prática.

5.1. Finalidade do forno

O forno destina-se a martêmpera ou austêmpera, de aços ao carbono (0,45 a 1,25% C), em processo contínuo. Desenhado para processar fitas de aço, aqui designada por material, de até 500 mm de largura por até 4,5 mm de espessura, supridas em rolos de até 3000 kg. O preço de venda médio do material acabado é de R$10.000 por tonelada (US$4.600/t).

5.2. Características construtivas

As Figuras 5.1.a e 5.1.b apresentam o esquema do forno. Ele é constituído basicamente de 10 partes:

- **Desenroladores** - Os desenroladores têm uma dupla função: permitir desenrolar o material, que vem em forma de rolos, e manter o material tracionado através de um sistema adequado de frenagem;
- **Solda** – O estágio de solda mantém o sistema trabalhando de forma contínua, isto é, após a passagem do material de uma ordem de produção solda-se a ponta final

do último rolo à ponta inicial do primeiro rolo da próxima ordem de produção, mantendo o processo trabalhando continuamente. Desejando-se encerrar os trabalhos, passa-se uma fita de arraste (ou de espera) que fica dentro do forno aguardando o início da operação, sendo usada para arrastar a ponta inicial do primeiro rolo da próxima ordem de produção;

- **Acumulador (ou poço de espera)** – O poço de espera é utilizado para acumular o material, permitindo realizar a solda sem parar o processo. Se o material parar dentro do forno, perde-se a parte que vai da austenitização até o final do revenimento, aproximadamente 45 metros, pois haverá um crescimento exagerado do grão austenítico;
- **Austenitização** – A austenitização é responsável por elevar a temperatura do material até a região da austenita, acima da temperatura crítica 727 ºC. O aquecimento é feito por resistências elétricas Globar de carbeto de silício recristalizado para temperaturas de até 1650 ºC, sendo a temperatura medida por termopares dispostos em quatro zonas. Cada zona possui um conjunto de resistências em ligação trifásica e um controlador PID;
- **Resfriamento** – O resfriamento pode ser a água, óleo ou liga metálica fundida, conforme visto no capítulo 4. No forno em estudo utiliza-se o resfriamento por liga metálica fundida que permite um melhor controle da temperatura e uma eficaz troca de calor. Trata-se de um tanque contendo a liga metálica em estado líquido que reduz a temperatura de austenitização para um valor aproximado de 400 ºC, até que ocorra a homogeneização da temperatura. Possui uma malha de controle PID e a medida da temperatura é feita por termopares;
- **Resfriamento** – O resfriamento tem por finalidade completar o processo de têmpera, garantindo a estrutura e forma (planicidade) do material. É constituído de

placas de grafite refrigeradas por circulação de água industrial.

- **Pré-aquecimento** – O pré-aquecimento tem por finalidade aquecer o material antes da entrada no Revenimento. É constituído por uma base aquecida sobre a qual colocam-se placas de grafite. Possui uma malha de controle PID e a medida da temperatura é feita por termopares;
- **Revenimento** – O revenimento tem a função básica de ajustar a dureza do material, trabalha a temperaturas em torno de 500 ºC. É constituído de quatro zonas de aquecimento por resistências elétricas, onde cada zona tem uma malha de controle PID e a medida da temperatura é feita por termopares. A atmosfera é mantida sem oxigênio através da injeção de nitrogênio;
- **Resfriamento final** – O resfriamento final reduz a temperatura próxima da ambiente possibilitando o manuseio do material. Utiliza-se água industrial como meio refrigerante;
- **Tracionador –** O tracionador é responsável por arrastar a fita por todo o forno, é formado por um sistema "S-roll" que permite manter a velocidade constante para toda faixa de trabalho (0,1 a 15 m/min). Possui uma malha de controle PID;
- **Enroladores –** Os enroladores têm por função enrolar o material com tração controlada evitando-se o "coil-set", ou seja, que a tira de aço tome a forma do rolo. Ao ser desenrolada a tira deve estar plana com uma certa tolerância.

Ocupa uma área de 280 m2, sendo 70 m de comprimento por 4 m de largura. Opera em 3 turnos (24 horas por dia) necessitando de um operador por turno de trabalho.

5.3. Operação

O processo inicia-se com os ajustes, das temperaturas de austenitização, do tanque de chumbo, das placas de grafite, das temperaturas do revenimento e com a colocação dos rolos nos desenroladores. Após as temperaturas atingirem o equilíbrio térmico, arrasta-se a

fita através das prensas e guias de entrada até a máquina de solda. Faz-se a soldagem da tira com a fita de arraste quando se tratar de início de produção, caso contrário solda-se na tira do próximo rolo. Uma vez realizada a soldagem, liga-se o tracionador ("S-roll") e acompanha-se a passagem da tira pelas demais partes do forno, ajustando as guias e prensas até a chegada da ponta inicial no enrolador.

O ajuste inicial das temperaturas e da velocidade é realizado com base em procedimentos documentados. Após a passagem de alguns metros de material, é recolhida uma amostra para a medida da dureza, limite de resistência e "coil-set". De posse dos valores, ajusta-se, quando necessário, temperaturas, velocidade e tração. Estes ajustes dependem da experiência do operador.

Uma ordem de produção (de aproximadamente 500 kg) leva entre 4 a 6 horas para ser processada. A velocidade de processo varia entre 0,5 a 5 m/min para o aço CK75, dependendo das dimensões do material.