

CURSO BÁSICO DE AÇOS

Scheid, Adriano

CURITIBA 2010

Índice

1- Introdução à Siderurgia.....	03
2- As etapas do Processo Siderúrgico.....	04
2.1- Redução.....	05
2.2- Refino.....	09
2.3- Conformação Mecânica.....	18
3- O Diagrama de Equilíbrio Fe-Fe ₃ C.....	28
3.1- Introdução.....	28
3.2- Estruturas Cristalinas.....	28
3.2.1- Reticulado Cristalino.....	28
3.2.2- Estrutura Cúbica de Corpo Centrado.....	31
3.2.3- Estrutura Cúbica de Faces Centradas.....	32
3.3- Interstícios.....	33
3.4- Índices de Miller.....	34
3.5- Defeitos na Estrutura Cristalina.....	35
3.6- Estrutura do Ferro Puro.....	38
3.6.1- Alotropia.....	38
3.6.2- Solução do Carbono no Ferro.....	39
3.7- Diagrama Ferro-Carbono.....	41
4- Propriedades Mecânicas dos Aços e as formas de alteração.....	45
4.1- Soluções Sólidas, Formação de Fases e sua relação com o processo siderúrgico.....	45
4.2- Tratamentos Térmicos e Tratamentos Termomecânicos (transformações de fase / microestruturas, refinamento do grão) e sua relação com o processo siderúrgico.....	48
4.2.1- Diagrama de Resfriamento Contínuo.....	53
5- Classificação de Aços - Aços Carbono, Aços Liga, Aços Inoxidáveis e Aços Ferramenta.....	62
5.1- Aços Carbono.....	62
5.2- Aços Liga.....	69
5.3- Aços Inoxidáveis.....	72
5.4- Aços Ferramenta.....	79
6- Aplicações.....	89

1- Introdução à Siderurgia

A Siderurgia é a ciência que estuda a produção de aços. O processo Siderúrgico está dividido em três grandes etapas: Redução, Refino e Conformação Mecânica. A redução é a etapa que visa transformar os minérios de Ferro em Ferro gusa (redução em alto forno) ou Ferro esponja (redução direta). O refino envolve os processos de transformação dos produtos da redução dos minérios de Ferro em aço, com composição química adequada ao uso. Por último, a conformação mecânica visa a transformação mecânica dos aços em produtos que possam ser utilizados pela indústria e envolve, de forma geral, a lamação, trefilação e o forjamento.

As usinas siderúrgicas podem ser classificadas quanto ao grau de integração, como: usinas integradas, semi-integradas e não-integradas. As usinas integradas são aquelas que operam com processos de redução, refino e conformação na mesma planta, partindo do minério de Ferro para a produção do aço. As usinas semi-integradas são aquelas em que apenas as etapas de refino e conformação estão presentes, partindo do Ferro gusa, esponja ou sucata para a produção do aço. Finalmente, as usinas não-integradas apresentam apenas uma das etapas do processo siderúrgico, que pode ser redução (produtores independentes de gusa) ou conformação (relaminadores de aço).

De forma geral, podemos apresentar as linhas de produtos siderúrgicos, conforme segue:

- Produtos Semi-Acabados: constituídos pelos blocos, tarugos e placas.
- Produtos Não-Planos (Longos): englobam os perfis (U, H, T, I, L), barras quadradas e redondas, vergalhões, fios e arames.
- Produtos Planos a Quente: constituídos pelas chapas grossas e finas a quente, podendo ser fornecidas em bobinas.
- Produtos Planos a Frio: incluem as chapas a frio e folhas não revestidas.
- Produtos Revestidos: grupo que engloba as chapas e bobinas galvanizadas, chumbadas, folhas-de-flandres e folhas cromadas.

2- As Etapas do Processo Siderúrgico

A figura 2.1 apresentada a seguir mostra o fluxo esquemático dos processos envolvidos na produção do aço, envolvendo as etapas de redução e refino, com as suas respectivas rotas (inclui as etapas até o lingotamento dos aços). Este fluxo não inclui a terceira etapa do processo siderúrgico, que é a conformação mecânica.

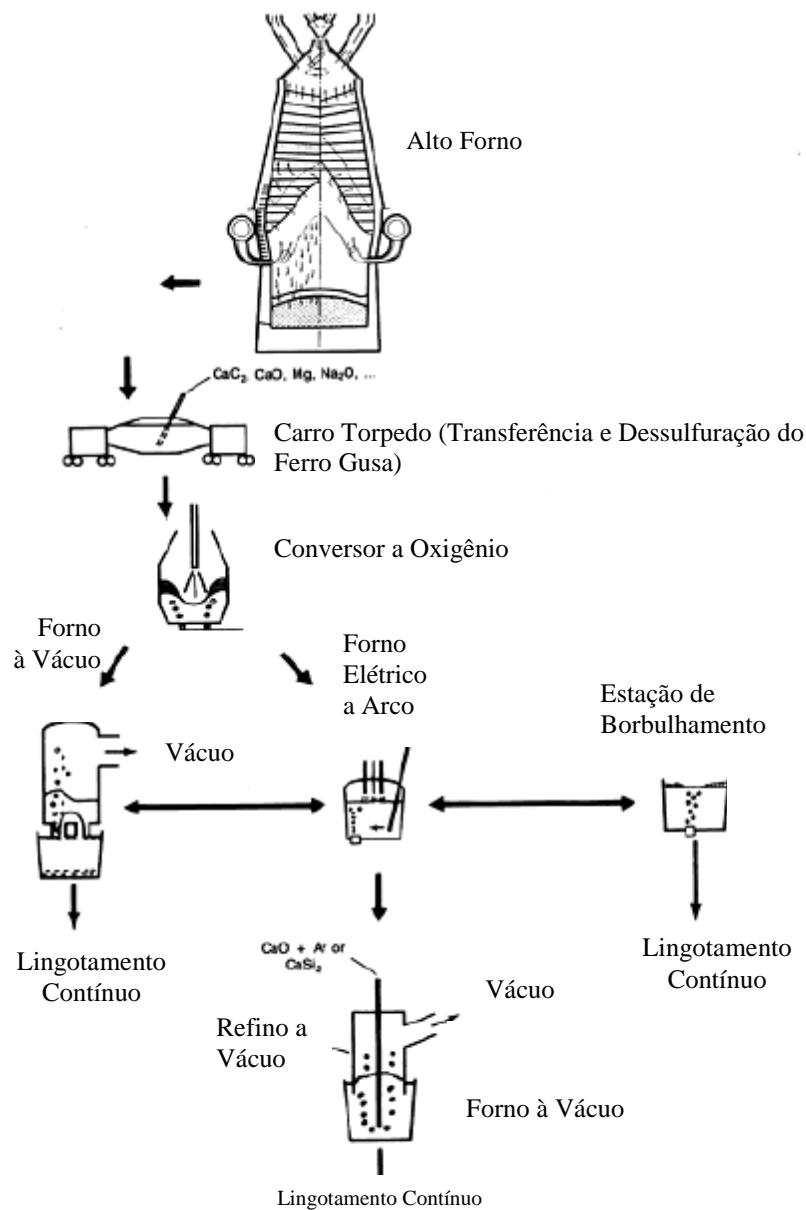


Figura 2.1 - Fluxo esquemático dos processos envolvidos na produção do aço.

2.1- Redução

As mais importantes matérias primas utilizadas em uma usina siderúrgica integrada são: o minério de Ferro, o carvão mineral e os fundentes (calcário e dolomita).

O Brasil possui minério de Ferro em abundância e de alta qualidade para a siderurgia. Também possui minas de calcário de dolomita. O carvão mineral, que dá origem ao coque que é utilizado em altos-fornos é importado de diversos lugares ao redor do mundo, como Rússia e Austrália. O processo de fabricação de aço em uma usina integrada inicia com a formação de reservas destes insumos principais, denominados pátios de insumos que visam garantir o pronto abastecimento do processo, figura 2.2.

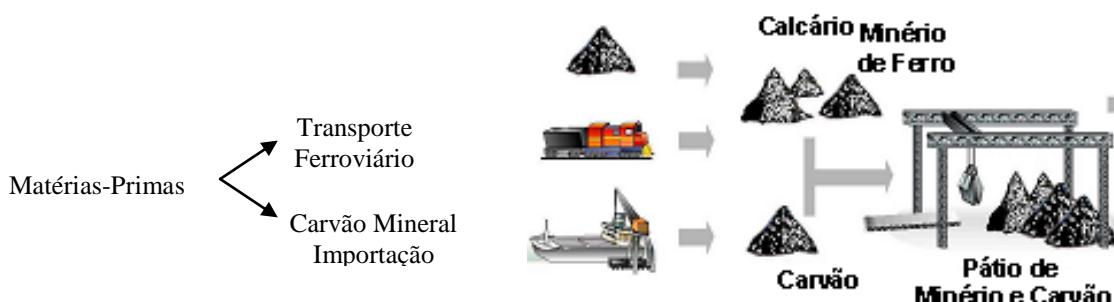


Figura 2.2 - Esquema do controle de insumos de uma usina siderúrgica integrada.

Primeiramente, o carvão mineral é processado na coqueria. A coqueria é constituída por um conjunto de fornos dispostos lado a lado, onde o carvão mineral é depositado, permanecendo por aproximadamente 16 horas a 1300°C sem contato com o ar. Durante o aquecimento os componentes voláteis do carvão são destilados e evaporados. O material sólido que resta nos fornos é uma massa de Carbono, denominada coque. O coque é retirado dos fornos e esfriado na estação de apagamento, figura 2.3.



Figura 2.3 – Esquema da transformação do carvão mineral em coque.

Paralelamente ao processo de produção de coque, o minério de Ferro é preparado para a utilização. A sinterização é um processo de aglomeração a quente de pequenas partículas de minério de Ferro juntamente com uma mistura com fundentes e finos de coque. O produto da sinterização é o sínter, que é uma forma de carga preparada para uso em altos-fornos de grande porte, figura 2.4.

Sinterização

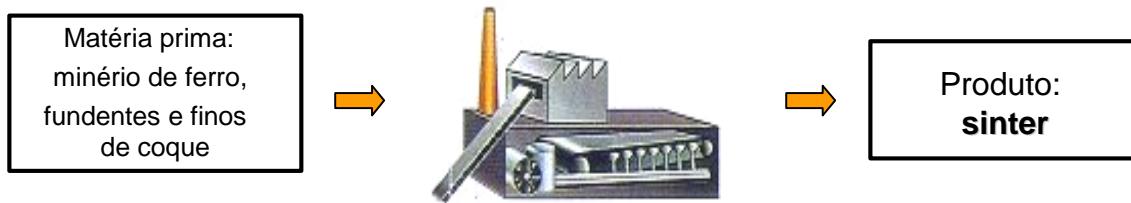


Figura 2.4 – Esquema da sinterização.

Uma vez preparadas as matérias-primas, inicia o processo de produção de aço, a partir da primeira etapa do processo siderúrgico, que é a Redução dos minérios de Ferro. Os insumos principais para o abastecimento dos altos-fornos (fornos utilizados para a redução de minérios de Ferro) são: sínter, coque, fundentes e minério de Ferro bitulado, figura 2.5.

Alto Forno

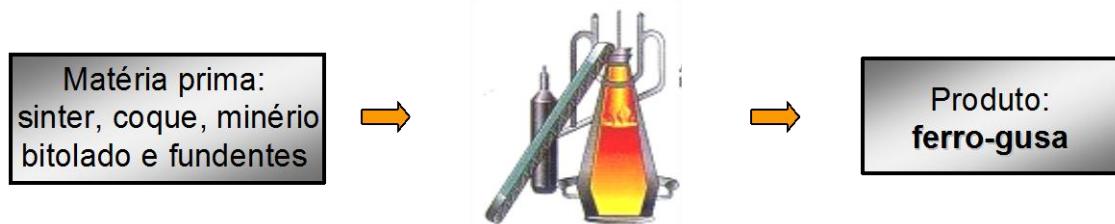


Figura 2.5 – Esquema da produção de Ferro gusa.

As matérias-primas são adicionadas pela parte superior do alto-forno, que promove a redução dos minérios, dando origem ao Ferro gusa. A redução do minério de Ferro em

Ferro metálico ocorre aproximadamente a entre 1500 e 1600°C, pela reação do Carbono e monóxido de Carbono com a hematita, magnetita e wüstita, conforme segue:



OBS: O CO₂ entra em contato com o coque aquecido e prontamente é transformado em CO, que promove a redução juntamente com o Carbono presente no coque aquecido e que está em contato com o FeO.

Após a redução, saem do alto forno o Ferro gusa e a escória, ambos no estado líquido, e são separados por diferença de densidade. A escória tem composição aproximada de 40% SiO₂, 50% CaO (+MgO) e 10% Al₂O₃. O Ferro gusa líquido é transferido para a acaria por meio de carros-torpedo, figura 2.6.

Visão esquemática do processo do alto-forno

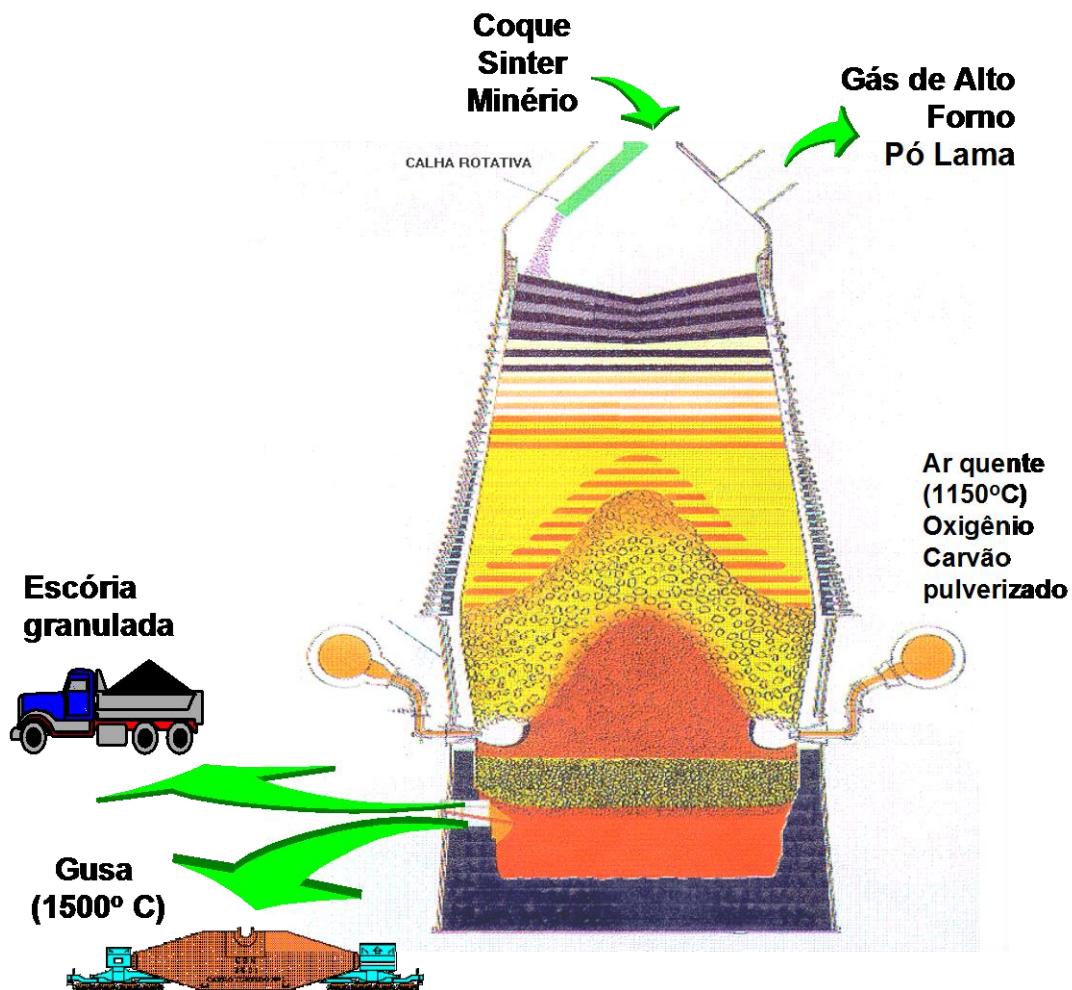


Figura 2.6 – Visão esquemática da redução.

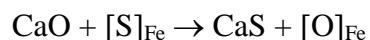
A seguir é apresentada uma fotografia de um alto-forno moderno em funcionamento no Brasil, figura 2.7.

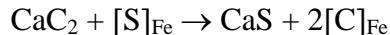


Figura 2.7 – Fotografia de um Alto-Forno.

2.2 - Refino (Aciaria)

O Ferro gusa ainda nos carros-torpedo (antes de chegar na aciaria) é levado à uma estação de dessulfuração de gusa (EDG). O Enxofre presente no gusa é um elemento indesejável pois afeta a transformação mecânica dos aços e, na maior parte dos casos, é prejudicial às propriedades mecânicas. Na EDG, uma lança é imersa no Ferro gusa líquido que está dentro do carro-torpedo, soprando Nitrogênio (N), Carbeto de Cálcio em pó (CaC_2), Óxido de Cálcio (CaO) e Magnésio, ou ainda misturas destes. Ocorre uma reação de formação de CaS (Sulfeto de Cálcio) que é menos denso que o gusa líquido e flota até a superfície, sendo então removido. Serão apresentadas a seguir as principais reações que ocorrem na dessulfuração.





Desta forma, o Enxofre é removido até os teores especificados para cada tipo de aço. Caso a dessulfuração não leve o teor de Enxofre aos limites especificados, nova dessulfuração deverá ser realizada após a transferência do Ferro gusa para a panela transferidora na aciaria.

A transformação do Ferro gusa em aço é largamente realizada em conversores por meio do sopro de Oxigênio, que promove a oxidação dos elementos do Ferro gusa que se deseja remover ou diminuir o teor, como o Carbono, Silício e Fósforo, figura 2.8. O teor destes elementos no Ferro gusa torna esse metal demasiadamente frágil para ser útil como material de engenharia, além de impossibilitar a sua transformação posterior. O Carbono é queimado e evolui para fora do banho de metal líquido na forma de CO e CO₂. Os elementos Silício, Manganês e Fósforo são oxidados durante o sopro de Oxigênio e, juntamente com a adição de CaO (fluxo) formam escória rica nestes elementos, a qual sobrenada o banho sendo removida. As principais reações que ocorrem nesta etapa de refino são:

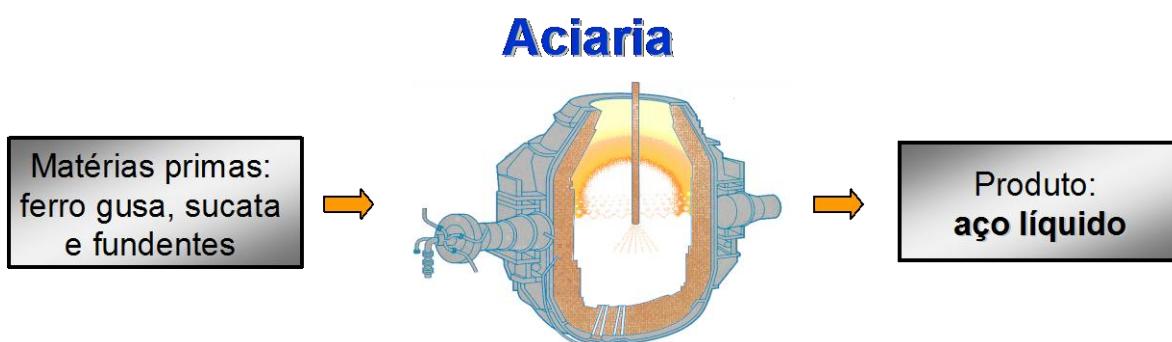
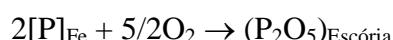
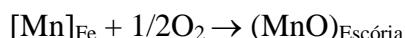
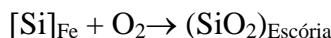


Figura 2.8 – Esquema do refino em conversor a Oxigênio.



Figura 2.9 – Fotografia mostrando o carregamento de Ferro gusa no Conversor a Oxigênio.

A adição de sucata de aço nos conversores evita que a temperatura atinja valores muito altos durante a oxidação, já que as reações de queima de C e Si são exotérmicas, figura 2.10.



Figura 2.10 – Fotografia mostrando o carregamento de sucata no conversor.

O sopro de Oxigênio leva de 15 a 20 minutos, tempo adequado para que os teores de C, Si, Mn e P atendam especificações do aço. Este ciclo transforma o Ferro gusa em aço e é também chamada de metalurgia primária. O aço produzido é dito efervescente, pois contém elevados teores de Oxigênio.

O aço efervescente é, então, acalmado durante a transferência para outra panela, iniciando a metalurgia secundária. Os principais objetivos desta etapa são: acalmar o aço (desoxidar), acertar a composição química para atendimento às normas, acertar a temperatura para o lingotamento contínuo.

A metalurgia secundária pode ser realizada de diferentes maneiras, dentre elas podemos citar: a) Estação de Borbulhamento (figura 2.11), b) Forno Panela (forno elétrico, figura 2.12) e c) Forno a Vácuo (Ruhrstahl Heraeus – RH, figura 2.13).

A rota mais simples de produção é via estação de borbulhamento, em que a panela contendo o aço acalmado recebe sucata para a redução da temperatura ou Ferro ligas (Fe-Si) para o aquecimento da carga a partir do sopro de Oxigênio. Nitrogênio é posteriormente soprado para homogeneizar a temperatura.



Estação de borbulhamento

Figura 2.11 – Fotografia da estação de borbulhamento.

A segunda alternativa, mais utilizada para a produção de aços com teor mais elevado de elementos de liga é a rota forno panela. Neste caso, uma abóboda contendo eletrodos fecha a panela e estabelece arco elétrico eletrodos/aço líquido. Isto permite que adição de ligas (frias) sejam realizadas sem a redução da temperatura do banho.



Forno-panela

Figura 2.12 – Fotografia do Forno-Panela.

A terceira opção é a rota de forno a vácuo (RH). Nesta rota, aços especiais com teores baixíssimos de elementos intersticiais são produzidos, como aços para estampagem extra profunda para a indústria automobilística. Estes aços são referidos como aços IF (Interstitial Free). Neste processo, uma abóboda contendo duas colunas é imersa no aço líquido. Uma das colunas borbulha Argônio e reduz a densidade relativa naquela perna. Como consequência, o aço circula na parte superior da abóboda que apresenta uma atmosfera de baixa pressão. Desta forma, elementos intersticiais como Hidrogênio, Nitrogênio, Carbono e Oxigênio são removidos.



RH (Ruhrstahl Heraeus)

Figura 2.13 – Fotografia do Forno à Vácuo.

- LINGOTAMENTO CONTÍNUO

O lingotamento contínuo transforma o aço líquido em placas ou tarugos sólidos de aço, em dimensões apropriadas ao seu manuseio e subsequente transformação mecânica por laminação. O aço é moldado e solidificado de maneira progressiva da superfície para o núcleo do veio, formando a placa, bloco ou tarugo, figuras 2.14 à 2.17.

Neste momento, a siderurgia é dividida em função dos produtos. Os aços são denominados Planos ou Não-Planos (longos), sendo que o primeiro grupo é originado na laminação de placas e o segundo na laminação de blocos ou tarugos.

As placas, blocos ou tarugos são cortados ao final do lingotamento em comprimentos pré-definidos como função da faixa de peso do produto final, buscando-se maximizar a produtividade dos processos subsequentes, figura 2.18.

-Dimensões das Placas: espessura = 50 - 250 mm; largura = 600 a 2000 mm; comprimento = 4900 a 10500 mm.

- Dimensões dos Blocos: seção quadrada com lado entre 150 e 300mm.
- Dimensões dos Tarugos: seção quadrada ou circular com lado entre 50 e 125mm (ou diâmetro).

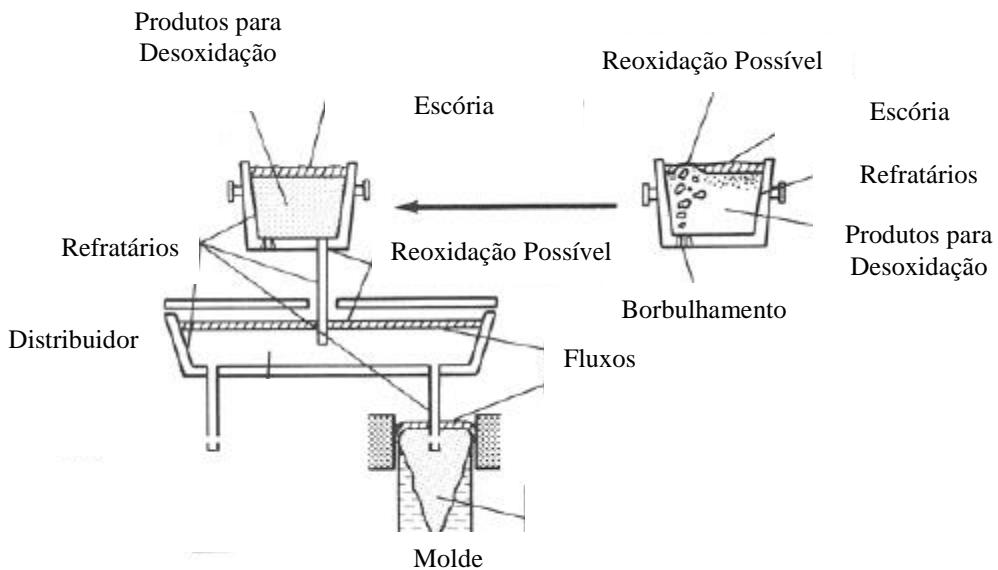


Figura 2.14 - Esquema do sistema de lingotamento de aços.

Lingotamento Contínuo

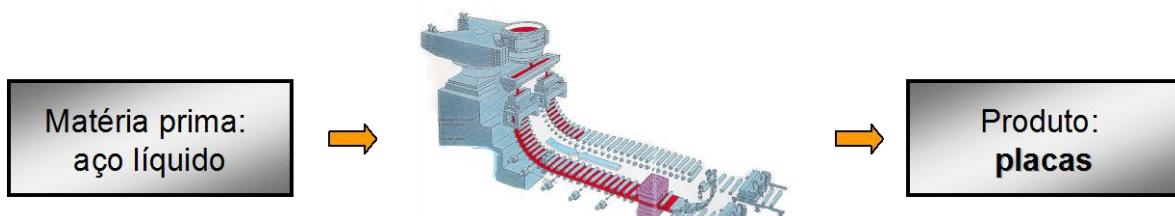


Figura 2.15 - Esquema do lingotamento contínuo de placas.

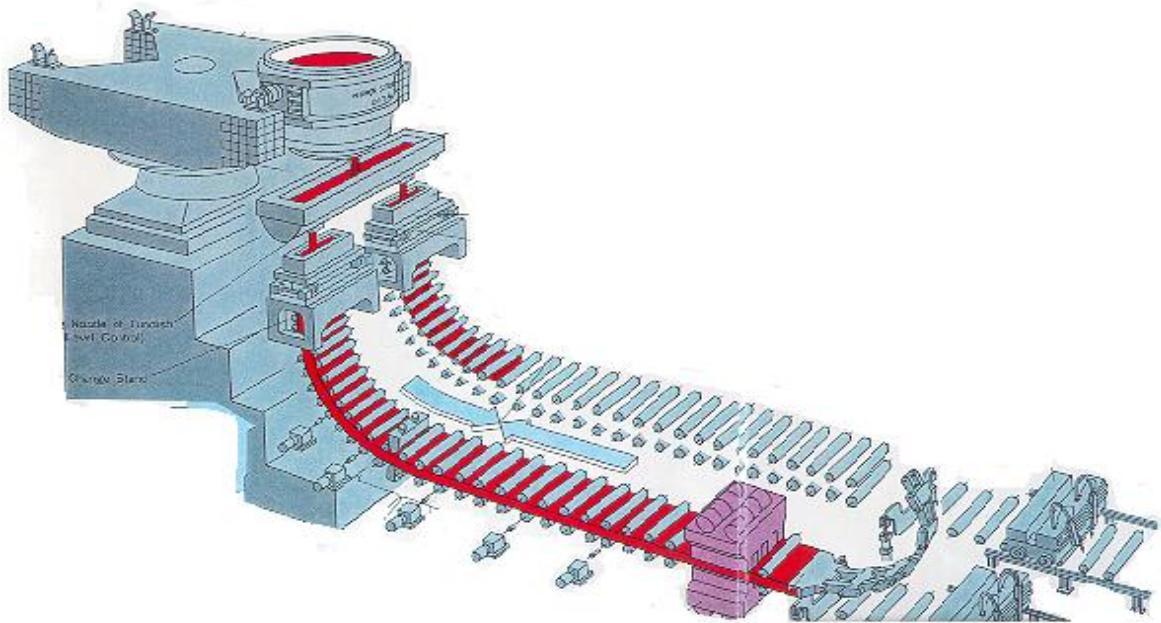


Figura 2.16 - Esquema do lingotamento contínuo de placas.



Máquina de Lingotamento

Placas ao final do lingotamento.

Figura 2.17 – Fotografias da máquina de lingotamento.



Figura 2.18 – Fotografia da placa sendo cortada.

Ao final do lingotamento, as placas, blocos ou tarugos são identificados e levados para os pátios de armazenamento onde aguardarão o sequenciamento para a Laminação.

2.3 - Conformação Mecânica

A Laminação de Placas, Blocos ou Tarugos é a etapa em que o aço lingotado passa por grandes deformações, dando origem aos mais variados produtos siderúrgicos, denominados de produtos acabados.

A lamination é realizada em altas temperaturas e é denominada de Laminação de Tiras à Quente - LTQ (partindo de placas) quando se destina à produção de chapas e Laminação de Barras e Perfis, quando parte de blocos ou tarugos, dando origem aos perfis (vigas I, U, H, especiais) e às barras laminadas a quente com seções inteiriças (redonda, quadrada, sextavada, oitavada, barra-chata) ou seções em formato de perfil (U, T, cantoneiras, especiais).

Os objetivos gerais da Laminação à Quente são:

- Viabiliza a transformação radical nas dimensões e forma do produto, uma vez que permite grandes deformações,
- Confere forma e dimensões requeridas no produto (normas).
- Elimina a estrutura e defeitos de solidificação, permitindo uma ampla utilização do aço.
- Aumenta a resistência mecânica do material.

LAMINAÇÃO A QUENTE DE PLACAS

A Laminação de Tiras à Quente envolve cinco estágios principais: reaquecimento, desbaste, acabamento, resfriamento e bobinamento. A placa de aço é reaquecida em forno a uma temperatura superior a 1150°C e conduzida para o processo termomecânico de laminação a quente. O processo de LTQ consiste na deformação a quente do aço através da sua passagem entre cilindros em vários passes, até atingir a dimensão final do produto. Ao sair da última “cadeira de laminação”, a chapa é resfriada com água até uma temperatura pré-determinada e enrolada na forma de uma bobina de aço. A bobina laminada a quente é estocada para ser enviada aos clientes ou para seguir processamento no fluxo de produção da usina siderúrgica.

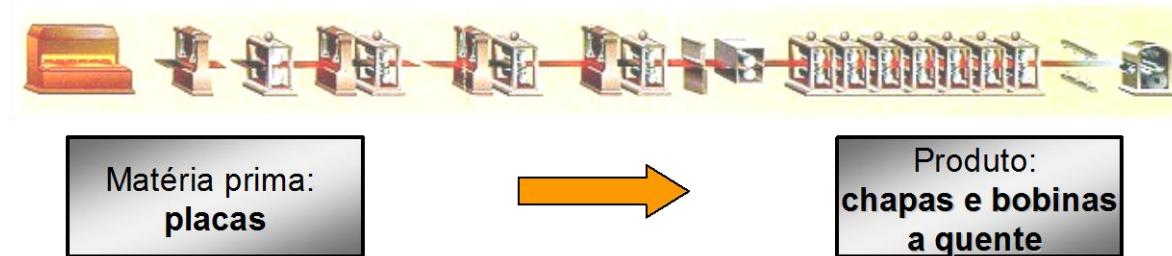


Figura 2.19 - Esquema da laminação de tiras a quente.

1º Estágio: Reaquecimento

Os principais objetivos do reaquecimento são:

- Elevar e homogeneizar a temperatura da placa até 1150°C a 1250°C,
- Dissolver partículas formadas após o lingotamento e durante o resfriamento da placa (aços Carbono).



Figura 2.20 - Placa ao final do reaquecimento entrando no leito do Laminador de Tiras à Quente.

2º Estágio: Laminação de Desbaste

Os principais objetivos do desbaste são:

- Reduzir a espessura da placa de ~ 250 mm até ~ 35 mm (produzir o esboço) em ~ 6 a 10 passes (usual 8 passes),
- Definir a largura final do produto, reduzindo em 40 a 110 mm a largura da placa,
- Eliminar o alargamento e eliminar a estrutura bruta de solidificação e vazios da placa.

Para tal, são utilizados laminadores esboçadores horizontais (normalmente quádruos reversíveis ou quádruos contínuos conjugados), laminadores esboçadores verticais Edger e equipamentos para realizar as descamações.



Figura 2.21 - Laminador de Desbaste.

3º Estágio: Laminação de Acabamento

Os principais objetivos do acabamento são:

- Conferir as dimensões e condições de forma finais ao produto laminado de maneira uniforme e com mínimas variações,
- Conferir as características mecânicas e microestruturais desejadas no produto final laminado.

Para tal, são utilizados laminadores horizontais conjugados (trens de laminação – laminadores tandem) com velocidade de até 1308 mpm na última cadeira. São utilizadas modernas tecnologias como: AGC hidráulico (F5/F6/F7), Roll Bending Force (F2 a F7) e WRS (F2/F3/F4).



Figura 2.22 - Laminador de Acabamento com sete cadeiras.

4º Estágio: **Resfriamento**

Os principais objetivos do resfriamento são:

- Resfriar a tira desde a temperatura de fim de laminação até a temperatura de bobinamento desejada;
- Tratar térmicamente o produto;
- Conferir características mecânicas e microestruturais no produto laminado.

A seção apresenta normalmente bancos de chuveiros tipo “Laminar Flow”, superiores basculantes e inferiores fixos com chuveiros em cada banco e ainda bancos tipo “vernier” (acionamento individual).

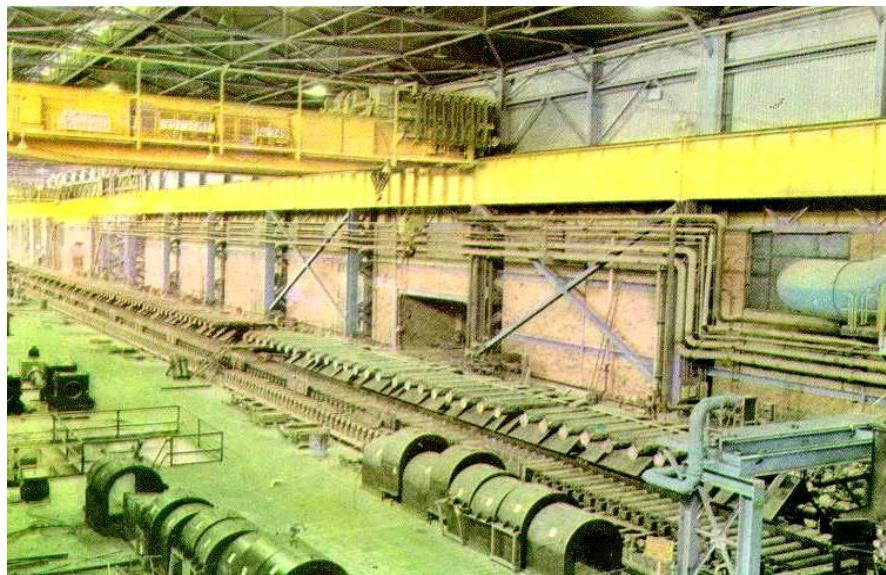


Figura 2.23 - Seção de resfriamento com água.

5º Estágio: Bobinamento

Os principais objetivos do resfriamento são:

- Enrolar a tira na forma de bobina;
- Formar um volume compacto que permitirá um resfriamento lento do material, facilitará o transporte, manuseio e utilização e minimizará danos no produto laminado.



Figura 2.24 - Fotografia de uma tira laminada a quente durante o bobinamento.

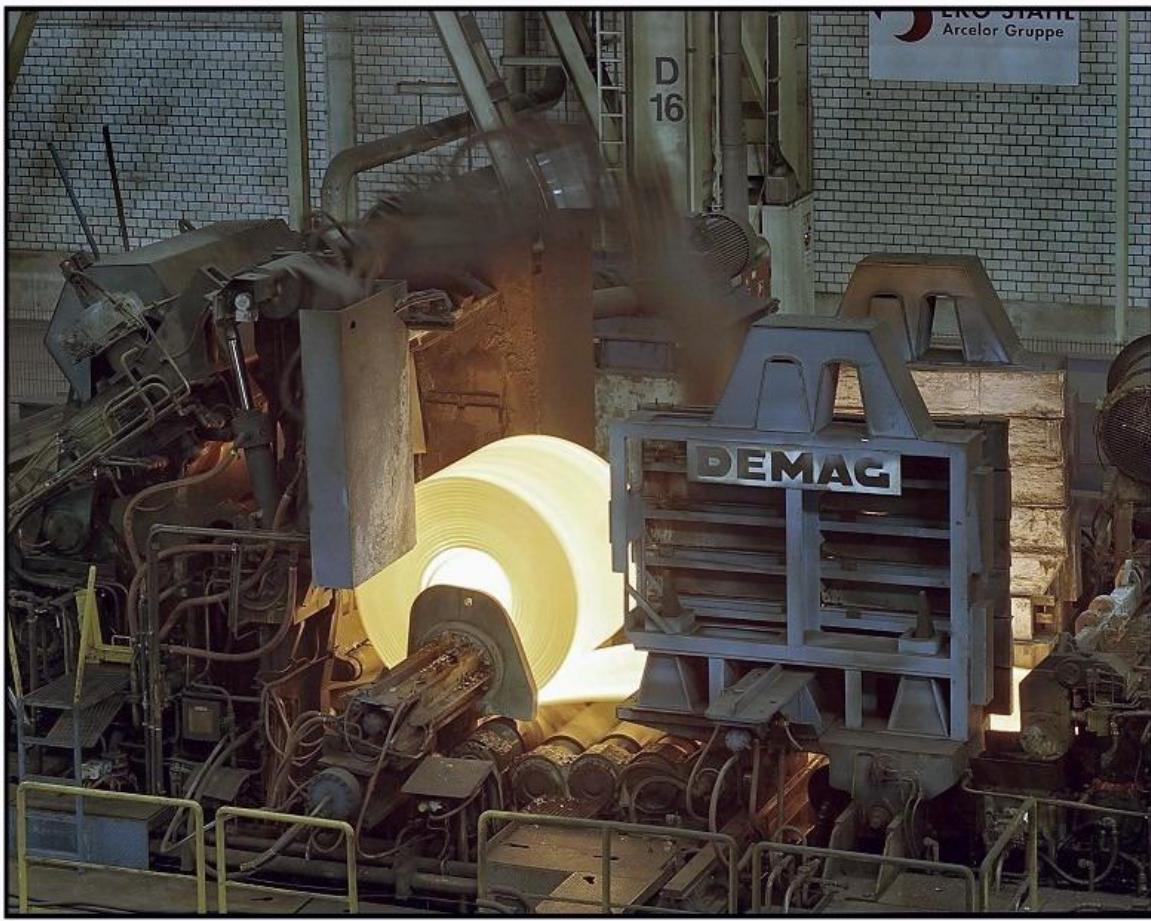


Figura 2.25 - Boninador de Chapas Grossas.

LAMINAÇÃO DE BARRAS E PERFIS

Barras de seção circular e hexagonal e perfis estruturais como vigas I, calhas e trilhos são produzidos em grande quantidade por laminação a quente. Atualmente, a laminação de blocos e tarugos se enquadra nesta categoria. O processo consiste na deformação a quente do aço através da sua passagem entre rolos ranhurados em vários passes e, difere da laminação de tiras porque recebe deformação em duas direções, pelo giro a 90° entre passes, até atingir a dimensão final do produto.

A Laminação de Barras e Perfis envolve o reaquecimento, uma cadeira de desbaste, uma cadeira formadora e uma de acabamento. O bloco ou tarugo é reaquecido em forno a uma temperatura superior a 1150°C e conduzida para o processo termomecânico de laminação a quente. Ao sair da última “cadeira de laminação”, a barra ou perfil é resfriado com água até uma temperatura pré-determinada, podendo ou não ser enrolado na forma de

espiras de fio máquina ou permanecer segmentado. Estes laminadores são equipados com guias que conduzem o tarugo para as ranhuras e repetidores para inverter a direção da barra e conduzi-la ao próximo passe.

1º Estágio: Reaquecimento

Os principais objetivos do reaquecimento são:

- Elevar e homogeneizar a temperatura do bloco ou tarugo até a temperatura de Laminação,
- Dissolver partículas formadas após o lingotamento e durante o resfriamento do bloco ou tarugo.

2º Estágio: Laminação de Desbaste

Os principais objetivos do desbaste são:

- Reduzir a espessura do bloco ou tarugo desde a dimensão no estado lingotado até as dimensões apropriadas à formação dos perfis.
- Eliminar a estrutura bruta de solidificação e vazios do bloco ou tarugo.

A figura 2.26 mostra um tarugo durante a lamação a quente.



Figura 2.26 - Laminação de desbaste de um tarugo.

3º Estágio: Laminção de Barras e Perfis

Os principais objetivos do acabamento são:

- Conferir a forma final ao produto laminado de maneira uniforme e com mínimas variações dimensionais,
- Conferir as características mecânicas e microestruturais desejadas no produto final laminado.

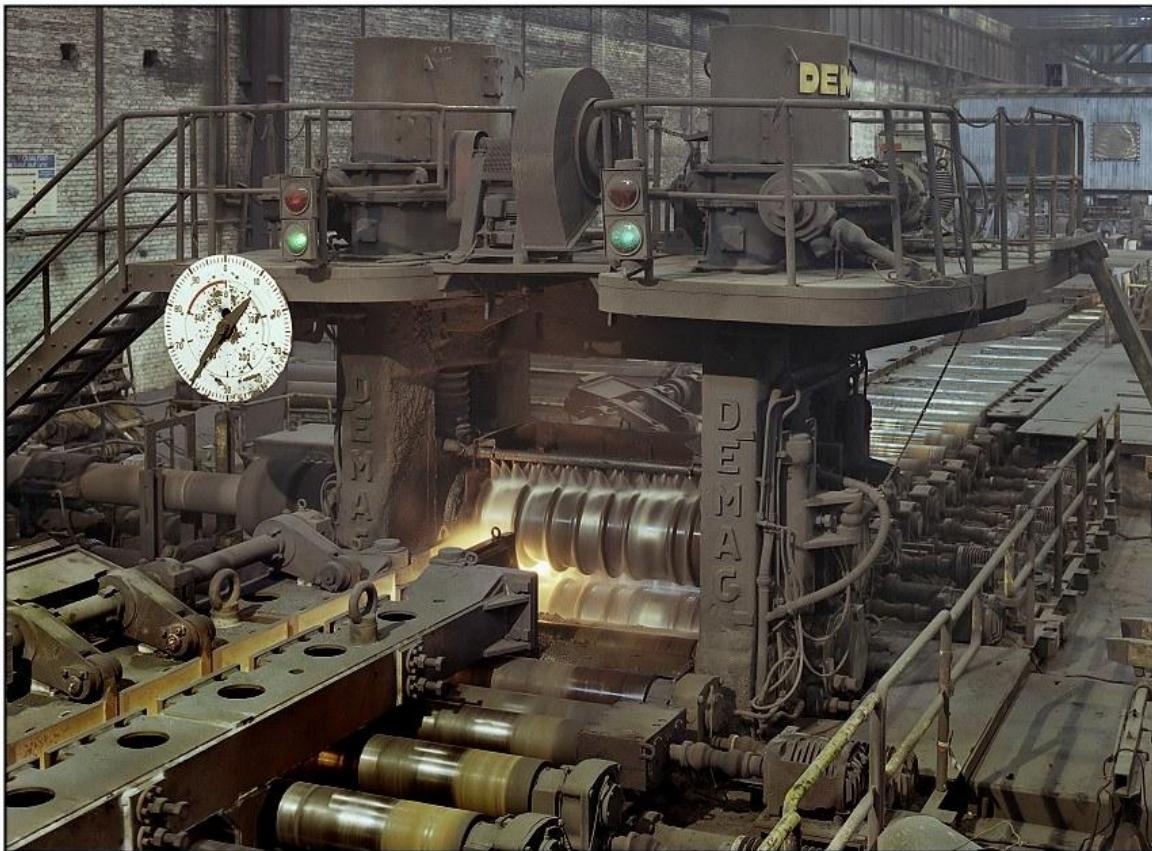


Figura 2.27 - Laminador de Barras e Perfis (cadeira formadora).

3- O Diagrama de Equilíbrio Fe-Fe₃C

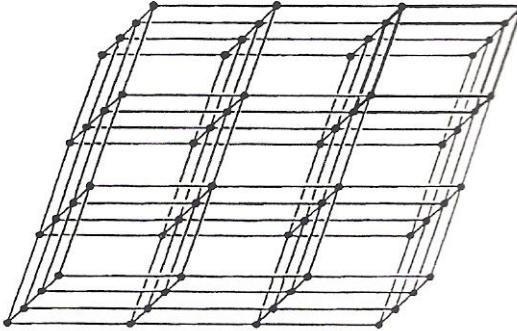
3.1 - Introdução

O Ferro é o principal constituinte de uma das ligas mais importantes da engenharia: o aço. Os aços são empregados nos mais variados componentes. Fica difícil imaginar um equipamento que não possua uma peça de aço em sua constituição. O Ferro é um metal alotrópico, isto é, ele apresenta mais de uma estrutura cristalina em função da temperatura. Quando solidifica a 1538°C, o Ferro assume organização interna conforme uma estrutura cúbica de corpo centrado, a fase δ (delta). Continuando o resfriamento, ocorre uma mudança de fase na temperatura de 1394°C com os átomos de Ferro sofrendo um rearranjo para uma estrutura cúbica de faces centradas, a fase γ (gama). Na temperatura de 912°C ocorre um novo rearranjo cristalino e o Ferro volta a apresentar uma estrutura cúbica de corpo centrado, a fase α (alfa). Abaixo da temperatura de 768°C (ponto Curie) o Ferro passa a apresentar um comportamento magnético sem, no entanto, apresentar qualquer mudança da estrutura cristalina. Todas estas transformações alotrópicas ocorrem com liberação de calor no resfriamento (reações exotérmicas) e com absorção de calor no aquecimento (reações endotérmicas), com cada uma delas envolvendo certa quantidade de energia. A existência destas transformações faz com que os aços apresentem-se como uma classe de materiais extremamente versáteis atendendo a um grande espectro de propriedades mecânicas.

3.2 - Estruturas Cristalinas

3.2.1 - Reticulado Cristalino

Todos os metais, incluindo-se neste caso o Ferro puro, possuem o que se convenciona chamar de estrutura cristalina. Para que possamos entender do que se trata vamos considerar uma rede de pontos que se prolonga infinitamente nas três direções do espaço como mostrado na figura 3.1.



3.1 - Representação de uma rede de pontos que serve para o estudo das estruturas cristalinas (Guy)

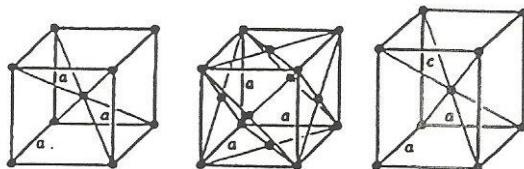
Se todas as retas que formam a rede estiverem regularmente espaçadas em cada uma das direções, os pontos de intersecção estarão também regularmente espaçados e neste caso fica caracterizada uma rede espacial de pontos. Observando-se a figura 3.1 vemos que a geometria da rede espacial fica perfeitamente caracterizada se utilizarmos três vetores para defini-la. Assim, se tomarmos por base o comprimento dos três vetores com sendo **a**, **b**, e **c** e se tomarmos o ângulo entre estes mesmos vetores como sendo α , β e γ teremos o que se convenciona chamar de constantes de rede. Estas constantes nos permitem definir exatamente como os pontos se distribuem no espaço, pois, se repetirmos o comprimento de um vetor, por exemplo, **a** segundo a direção dada por α , encontraremos uma nova intersecção, ou seja, um outro ponto de rede. Similarmente se combinarmos a distância **b** com o ângulo β e a distância **c** com o ângulo γ encontraremos pontos a cada repetição.

Devemos entender, ainda, que em um enfoque puramente geométrico, tanto as distâncias quanto os ângulos podem ter o mesmo valor ou serem diferentes entre si, o que nos permitiria uma série de combinações. Indo um pouco adiante, poderíamos associar a esta rede espacial uma série de átomos distribuídos regularmente pelo espaço, não necessariamente localizados nos pontos de intersecção, mas respeitando a regularidade determinada pelas distâncias e pelos vetores. Desta forma teríamos caracterizada uma estrutura cristalina, que nada mais é do que uma rede de pontos regularmente espaçados com uma distribuição regular dos átomos.

Muitos materiais possuem uma distribuição característica e regular dos seus átomos sendo chamados então de materiais cristalinos. Como existe esta regularidade, uma

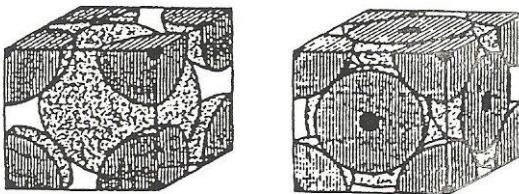
estrutura cristalina de um material não precisa ser representada por todos os seus átomos, mas apenas por um conjunto de átomos que possam definir a sua distribuição no espaço. Este conjunto de átomos deve ser escolhido de tal forma que uma vez repetidas as suas posições nas três direções do espaço tenhamos a representação de toda a estrutura cristalina do material. A esta pequena porção do reticulado cristalino que tem a propriedade de representar todo o cristal chamamos célula unitária. Uma célula unitária terá sempre associada uma figura geométrica (as distâncias \mathbf{a} , \mathbf{b} e \mathbf{c} e os vetores α , β e γ) e a distribuição característica dos átomos.

No estudo das estruturas cristalinas são utilizadas apenas sete figuras geométricas, caracterizando sete sistemas cristalinos e estes produzem um total de apenas quatorze distribuições características dos átomos, produzindo quatorze estruturas cristalinas. Embora alguns materiais possam apresentar distribuições mais complexas, apenas estas quatorze células unitárias são suficientes para permitir o estudo dos materiais cristalinos. Dentre os sistemas, os que mais interessam para o estudo dos tratamentos térmicos são: o sistema cúbico e o sistema tetragonal. As células unitárias da estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), cúbica de faces centradas (CFC) e estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC) podem ser vistas na figura 3.2.



3.2 - Representação esquemática das células unitárias da estrutura cúbica de corpo centrado, cúbica de faces centradas e estrutura tetragonal de corpo centrado (Guy).

Por uma questão de simplicidade os átomos em um reticulado cristalino são representados como esferas perfeitas, mas isto não implica em diferenças muito grandes em relação ao caso real. Uma representação deste tipo está apresentada na figura 3.3, respectivamente para a estrutura cúbica de corpo centrado e estrutura cúbica de faces centradas.



3.3 - Representação do modelo de esferas da estrutura cúbica de corpo centrado e também da estrutura cúbica de faces centradas (Avner).

Se olharmos mais atentamente para estas figuras, podemos retirar outros valores que são úteis para comparação entre as várias estruturas. Os parâmetros característicos mais utilizados são as medidas características dos vetores, chamado parâmetro de rede, o número de átomos por célula unitária, o número de vizinhos que cada átomo possui (átomos que distam entre si dois raios atômicos), chamado número de coordenação e a relação entre o volume ocupado pelos átomos e o volume da célula unitária, chamado de fator de empacotamento.

3.2.2 - Estrutura Cúbica de Corpo Centrado

A estrutura cúbica de corpo centrado é uma estrutura que possui os seguintes parâmetros geométricos: $a=b=c$ e $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$. Estes valores fazem com que a célula unitária seja caracterizada pela figura um cubo. Além disso, os átomos estão localizados nos vértices e no centro da célula, como pode ser visto nas figuras 3.2 e 3.3. Deve-se observar que no caso de átomos posicionados nos vértices tem apenas um oitavo do seu volume ocupando espaço na célula unitária. Neste caso o parâmetro de rede, representado pelo lado do cubo, vale $4R/\sqrt{3}$, o número de átomos por célula unitária é 2 (um átomo correspondendo à soma dos oito oitavos dos átomos dos vértices e mais o átomo localizado no centro da célula), número de coordenação de 8 e um fator de empacotamento de 0,68, onde R é o raio atômico. Deve ser lembrado que, embora estes parâmetros tenham sido retirados da célula unitária, eles são válidos para toda a estrutura cristalina. Isto significa que independente da célula unitária escolhida e do átomo tomado como referência devemos encontrar sempre os mesmos valores.

Tabela 3.1 - Classificação das estruturas cristalinas dentro dos sistemas cristalinos

Sistema cristalino	Parâmetro de rede e ângulo entre os eixos	Estrutura cristalina
Cúbico	Três eixos iguais em ângulo reto $a=b=c, \alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	Cúbica simples Cúbica de corpo centrado Cúbica de faces centradas
Tetragonal	Três eixos em ângulo reto, dois iguais $a=b \neq c, \alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	Tetragonal simples Tetragonal de corpo centrado
Ortorrômico	Três eixos desiguais em ângulo reto $a \neq b \neq c, \alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	Ortorrômico simples Ortorrômico de corpo centrado Ortorrômico de bases centradas Ortorrômico de faces centradas
Romboédrico	Três eixos iguais, ângulos iguais $a=b=c, \alpha=\beta=\gamma \neq 90^\circ$	Romboédrico simples
Hexagonal	Dois eixos iguais a 120° , terceiro eixo a 90° $a=b \neq c, \alpha=\beta=90^\circ, \gamma=90^\circ$	Hexagonal simples
Monoclínico	Três eixos desiguais, um ângulo diferente $a \neq b \neq c, \alpha=\beta=90^\circ, \gamma \neq 90^\circ$	Monoclínico simples Monoclínico de bases centradas
Triclínico	Três eixos desiguais, ângulos desiguais $a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	Triclínico simples

3.2.3 - Estrutura Cúbica de Faces Centradas

A estrutura cúbica de faces centradas possui os mesmos parâmetros geométricos que a estrutura cúbica de corpo centrado, porém, a distribuição dos átomos é um pouco diferente. Neste caso existem átomos localizados nos vértices e no centro de cada uma das faces do cubo, conforme as figuras 3.2 e 3.3. Isto faz com que os átomos das faces tenham apenas metade do seu volume ocupando espaço na célula unitária. O parâmetro de rede vale $4R/\sqrt{2}$, o número de átomos por célula unitária é 4 (um átomo correspondendo à soma dos oito oitavos dos átomos dos vértices e mais três átomos correspondentes aos átomos localizados nas faces), número de coordenação de 12 e um fator de empacotamento de 0,74.

Comparando-se o fator de empacotamento das duas estruturas pode-se ver que a estrutura CFC é mais compacta do que a estrutura CCC, isto é, os seus átomos ocupam de maneira mais eficiente o espaço. Se considerarmos o mesmo raio atômico, pode-se dizer que os átomos organizados segundo uma estrutura CFC ocuparão menor volume, o que conduzirá a uma maior densidade.

3.3 Interstícios

Em qualquer estrutura cristalina o fator de empacotamento é sempre menor do que um, isto é, os átomos não ocupam todo o espaço disponível na célula unitária. Este fato implica em que existam espaços vazios entre os átomos da estrutura. Estes espaços vazios recebem o nome de interstícios, e exercem um papel muito importante nos tratamentos térmicos dos aços. Normalmente existem vários interstícios em uma estrutura cristalina e quanto menor o fator de empacotamento maior é o volume destinado aos interstícios, embora o tamanho de cada um dependa do raio atômico e da estrutura cristalina.

Deste modo uma estrutura CFC possui interstícios maiores do que uma estrutura CCC, embora o seu fator de empacotamento seja maior. A principal consequência disto é que, quando se tiver uma solução em que os átomos do soluto se colocam em posições intersticiais, como é o caso da liga Ferro-Carbono, a estrutura que tiver os maiores interstícios apresentará uma maior solubilidade do que aquela que possui interstícios menores. Nas figuras 3.4 e 3.5 estão representados os interstícios das células CCC e CFC.

Um interstício sempre é denominado pela figura poliédrica formada pelos átomos que estão em volta do espaço vazio e desta forma vamos encontrar interstícios tetraédricos e interstícios octaédricos. Tanto a estrutura CCC quanto a estrutura CFC possuem estes interstícios, no entanto estes são maiores na estrutura CFC.

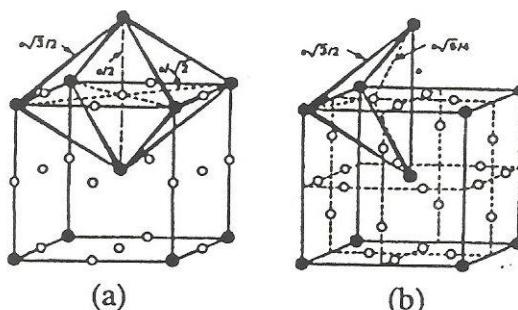


Figura 3.4 – Intestícios octaédricos (a) e interstícios tetraédricos (b) e uma estrutura cúbica de corpo centrado (Leslie).

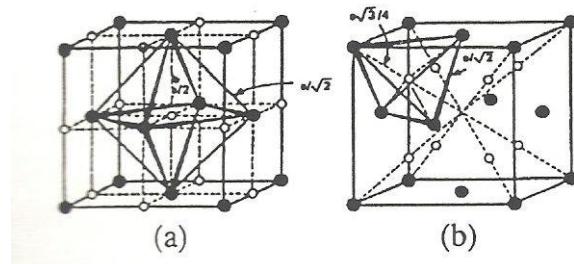


Figura 3.5 – Interstícios octaédricos (a) e interstícios tetraédricos (b) em uma estrutura de faces centradas (Leslie).

3.4 Índices de Miller

A disposição característica dos átomos na estrutura cristalina de um material faz com que existam direções e planos característicos para cada estrutura. Estas direções e planos tornam-se importantes pelo fato de influírem no comportamento do material como é o caso da deformação. Sempre que tivermos deformação esta se dará segundo determinadas direções e planos particulares para cada estrutura. Isto se deve principalmente ao fato de que existe uma maior densidade de átomos em determinadas direções gerando planos de escorregamento quando ocorre deformação plástica. Para a determinação exata das direções e planos foi criada uma notação apropriada que é chamada Índices de Miller. Nas figuras 3.6 e 3.7 são mostradas direções e planos característicos para as estruturas CCC e CFC.

Os índices de uma direção estão relacionados com as coordenadas de um ponto com relação à origem do sistema de eixos. Assim, a direção [100] corresponde a um vetor paralelo ao eixo x, enquanto que a direção [010] corresponde a um vetor paralelo ao eixo y. No caso dos planos, os índices correspondem ao inverso do valor das intersecções do plano com os eixos. Deste modo um plano (100) corresponde a um plano paralelo aos eixos y e z enquanto que um plano (010) corresponde a um plano paralelo aos eixos x e z.

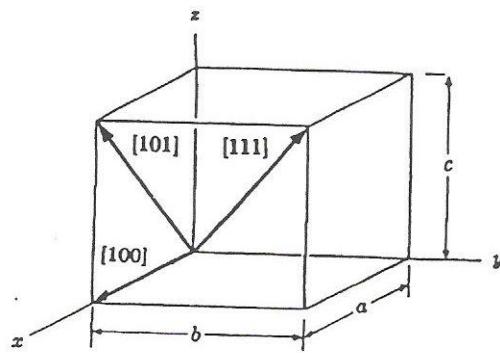


Figura 3.6 – Direções cristalinas em uma estrutura cúbica (Van Vlack)

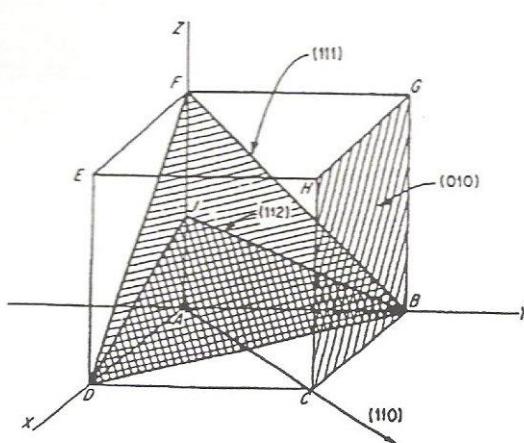


Figura 3.7 – Planos cristalinos em uma estrutura cúbica (Avner)

3.5 Defeitos na Estrutura Cristalina

Embora até aqui tenhamos representado uma estrutura cristalina como uma rede de pontos que se distribui regularmente pelo espaço com átomos a ela associados e também regularmente distribuídos, isto não acontece nos materiais cristalinos reais. Todos os materiais cristalinos possuem defeitos os quais podem influir decisivamente em suas propriedades. Abaixo relacionaremos alguns dos principais defeitos para que se tenha idéia de como os mesmos se apresentam no reticulado cristalino.

a - Lacunas

Este defeito é caracterizado pela ausência de um átomo em uma posição que deveria ser ocupada na estrutura cristalina. Isto gera uma deficiência de ligações entre os átomos

fazendo com que os mesmos tendam a se aproximar, o que provoca uma distorção na rede e produz um acúmulo de energia naquele ponto. Na figura 3.8 representamos este defeito.

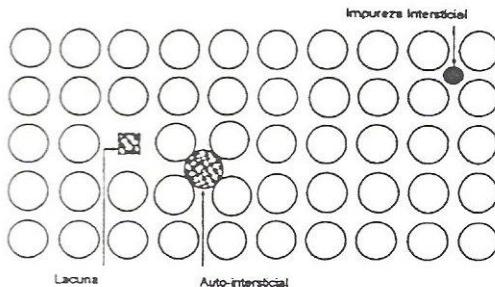


Figura 3.8 – Representação dos defeitos de lacuna, defeito auto-intersticial e defeito de impureza intersticial (Guy)

b – Defeitos Intersticiais

Caracteriza-se pela presença de um átomo em um interstício da estrutura cristalina. Neste caso o átomo pode ser do próprio elemento que forma a estrutura, sendo chamado de defeito auto-intersticial, ou por um átomo estranho, chamado defeito de impureza intersticial. Pelo fato dos interstícios em uma estrutura serem pequenos com relação aos átomos que abrigam, um defeito intersticial produz uma distorção e um acúmulo de energia muito maior do que uma lacuna. A figura 3.8 representa estes dois defeitos.

c – Discordâncias

Uma discordância é um defeito planar que envolve o posicionamento de uma série de átomos. O caso mais comum deste tipo de defeito é o que é chamado de discordância em cunha, o qual é mostrado na figura 3.9. Neste caso uma discordância em cunha pode ser vista como um plano extra de átomos, produzindo um efeito de cunha no reticulado. Por envolver um grande número de átomos uma discordância envolve um acúmulo de energia muito maior do que um defeito de lacuna ou intersticial.

As discordâncias exercem um papel muito importante na deformação plástica pois são elas que permitem o escorregamento de planos cristalinos que produzem a deformação. Se a discordância estiver livre para se deslocar pelo reticulado cristalino a deformação se

produz facilmente, ao passo que se existirem defeitos como os intersticiais ou a presença de precipitados, o deslocamento será dificultado restringindo a deformação. Isto irá se refletir em um aumento do limite de escoamento do metal.

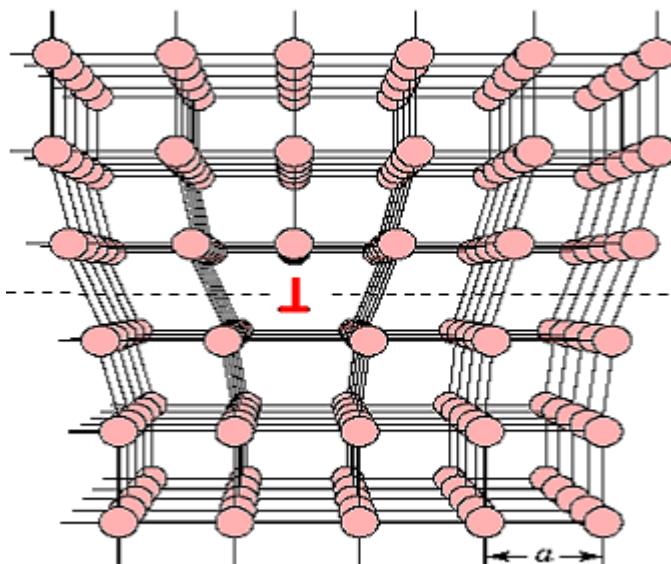


Figura 3.9 – Representação de uma discordância em cunha (Guy)

d – Contorno de Grão

Em um material real, não temos uma estrutura cristalina com uma única orientação. Se observarmos a orientação da estrutura de um material, veremos que ela é subdividida em um grande número de zonas, cada uma delas com uma orientação diferente, isto é, cada uma das zonas forma um cristal independente. A estes cristais que possuem uma orientação particular chamamos de grãos. Na figura 3.10 temos uma representação da disposição dos átomos no interior dos grãos. Todos os grãos de uma mesma fase do material possuem a mesma estrutura cristalina, diferindo somente na orientação. A consequência desta orientação diferente é na fronteira entre os grãos existe uma zona de transição entre duas orientações e, por isso, os átomos que fazem parte desta fronteira estão mal organizados e com um nível mais alto de energia. A esta região chamamos de contorno de grão.

O contorno de grão exerce um papel importante nas transformações de fase, onde a maior energia dos átomos favorece a nucleação e na deformação plástica, onde tem a função de restringir o movimento das discordâncias.

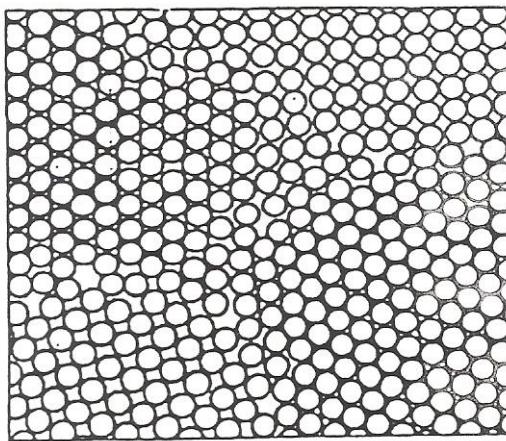


Figura 3.10 – Representação da distribuição dos átomos em um material policristalino (Van Vlack)

3.6 - Estrutura do Ferro Puro

3.6.1 - Alotropia

Alotropia é a propriedade que tem certos materiais de mudarem de estrutura cristalina dependendo da temperatura em que estiverem. O Ferro puro possui esta propriedade, podendo ter os seus átomos organizados em uma estrutura CCC ou em uma estrutura CFC. Desde a temperatura ambiente até 912^0C o Ferro apresenta uma estrutura cristalina CCC e nestas condições é chamado de Ferro α . De 912^0C até 1394^0C apresenta estrutura CFC e é chamado de Ferro γ . Finalmente de 1394^0C até o ponto de fusão à 1538^0C volta a apresentar estrutura CCC, sendo chamado de Ferro δ . Estas alterações na estrutura cristalina produzem uma série de implicações tanto nas transformações do Ferro puro quanto nas ligas de Ferro. Por exemplo, anteriormente foi citado que a estrutura CCC tem um fator de empacotamento de 0,68 enquanto que uma estrutura CFC tem um fator de empacotamento de 0,74. Quando o Ferro passa de CCC para CFC à 912^0C , esta diferença no fator de empacotamento provoca uma redução no volume e um aumento na densidade, figura 3.11.

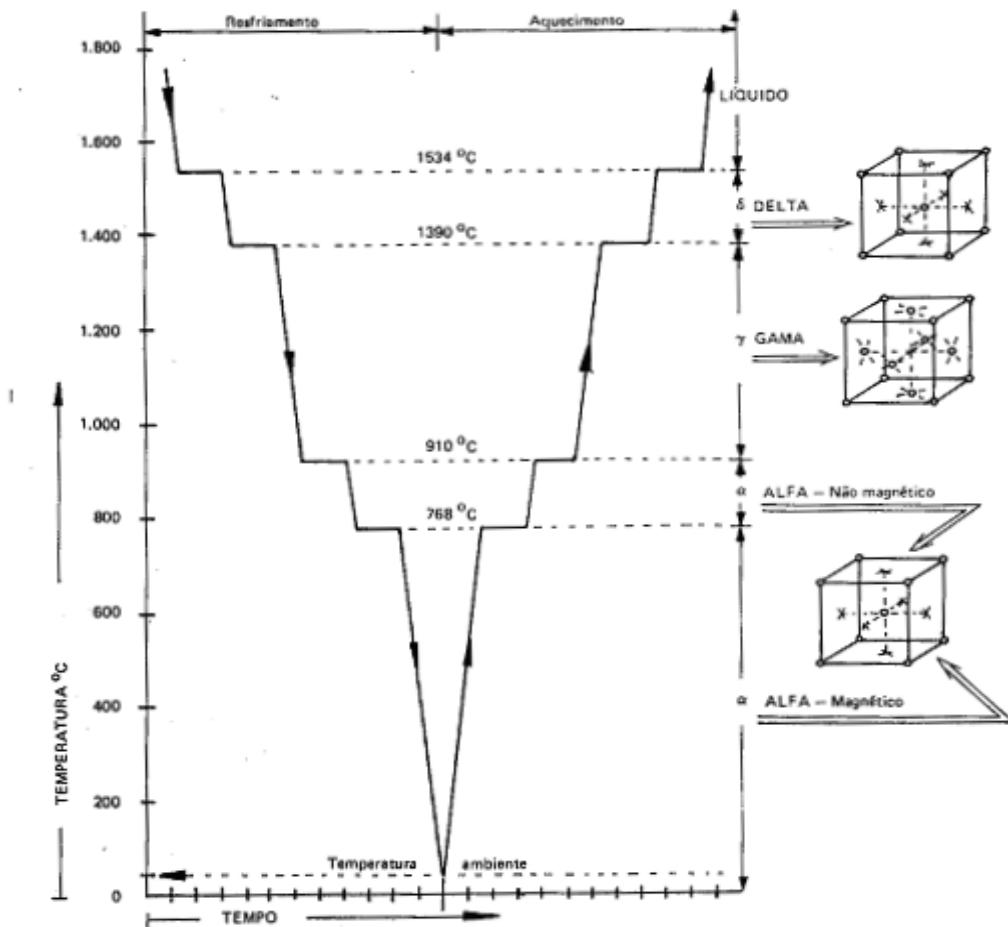


Figura 3.11 – Representação das transformações do Ferro puro no aquecimento e resfriamento.

3.6.2 - Solução do Carbono no Ferro

A aplicação mais importante de transformação alotrópica do Ferro se encontra nas ligas Ferro-Carbono. O Carbono forma uma solução sólida intersticial com o Ferro, isto é, os átomos de Carbono se colocam nos interstícios da estrutura cristalina do Ferro. A consequência prática deste tipo de solução é que teremos uma liga de baixo custo e com possibilidades de uma grande variação nas propriedades dependendo do teor de Carbono e do tratamento térmico utilizado.

Nas figuras 3.4 e 3.5 mostramos os interstícios tetraédricos e octaédricos que ocorrem nas estruturas CCC e CFC. Estes interstícios variam de tamanho de acordo com a estrutura, os interstícios da estrutura CCC são menores do que os da estrutura CFC. Isto significa que de acordo com o tamanho do interstício teremos um menor ou maior espaço

disponível para que um átomo de uma solução intersticial venha se colocar naquela posição. Como os átomos que entram em solução são sempre maiores do que os interstícios, cada átomo intersticial produzirá uma quantidade de distorção do reticulado cristalino e quanto menor for o interstício maior será a distorção. No caso da estrutura CCC os raios atômicos máximos possíveis para que não haja distorção correspondem a $0,29R$ para os interstícios tetraédricos e $0,15R$ para os interstícios octaédricos, onde R é o raio atômico do átomo que forma a estrutura. Na estrutura CFC estes valores correspondem a $0,23R$ para os interstícios tetraédricos e $0,41R$ para os interstícios octaédricos.

No caso da liga Ferro-Carbono estes valores correspondem a $0,36$ ângstrons e $0,19$ ângstrons para a estrutura CCC, onde o raio atômico do Ferro é $1,24$ ângstrons, e $0,29$ ângstrons e $0,52$ ângstrons para a estrutura CFC, onde o raio atômico do Ferro é $1,27$ ângstrons. Como o raio atômico do Carbono é de aproximadamente $0,77$ ângstrons é fácil notar que em qualquer situação teremos uma distorção do reticulado sempre que um átomo de Carbono se colocar em um interstício. Nas figuras 3.12 e 3.13 podemos ver uma representação desta situação. Quando forma-se a solução Ferro-Carbono, os átomos de Carbono se alojam nos interstícios octaédricos, pois estes propiciam uma melhor acomodação, o que implica em uma menor energia de distorção.

Do acima exposto pode-se entender facilmente que deverá haver uma menor solubilidade do Carbono no Ferro α do que no Ferro γ . No caso do Ferro α a solubilidade máxima do Carbono é de aproximadamente $0,025\%$ em peso ou $0,1\%$ em número de átomos, na temperatura de 723°C , enquanto que no Ferro γ a solubilidade máxima é de $2,1\%$ em peso ou 9% em número de átomos, na temperatura de 1148°C .

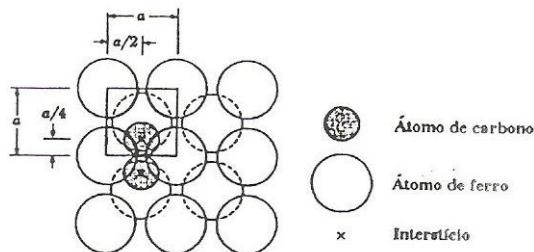


Figura 3.12 – Relação entre o tamanho do átomo de Carbono e o interstício octaédrico em uma estrutura CCC (Van Vlack).

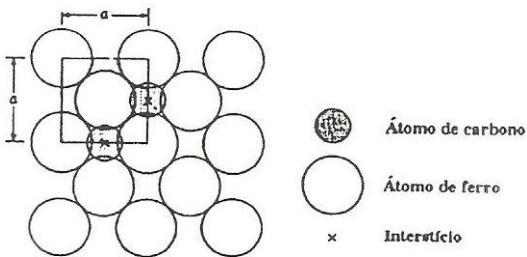


Figura 3.13 – Relação entre o tamanho do átomo de Carbono e o interstício octaédrico em uma estrutura CFC (Van Vlack).

3.7 - Diagrama Ferro-Carbono

As ligas Ferro-Carbono ainda hoje representam os materiais de maior utilização prática. Isto se deve ao fato de que estas ligas podem apresentar uma grande variação nas suas propriedades pela simples variação na quantidade de Carbono e ainda possibilitam que se tenha uma gama maior de propriedades se considerarmos a possibilidade de deformação plástica e os tratamentos térmicos. A base para que este material tenha estas características está principalmente atrelado ao fato de que o Ferro puro apresenta transformação alotrópica e que o Carbono forma uma solução sólida intersticial com o Ferro. Isto conduz a uma série de possibilidades de transformações, cada uma com suas microestruturas típicas, resultando na grande variação das propriedades. As transformações em uma liga Ferro-Carbono são influenciadas, basicamente, pela temperatura e pelo teor de Carbono. Se considerarmos apenas estes dois fatores, poderemos montar um mapa das transformações que irão ocorrer, o qual será chamado de *diagrama de equilíbrio termodinâmico ou diagrama de fases*. Na figura 4.1 podemos ver o diagrama de equilíbrio Ferro-Carbono. Nesta representação, podemos ver as fases presentes para cada temperatura e composição, e também os pontos que são fundamentais para a compreensão das transformações.

Em primeiro lugar deve ser observado que o diagrama vai somente até 6,69% de Carbono. Isto se deve ao fato de que as ligas acima deste teor não possuem qualquer importância comercial. Em segundo lugar, deve ficar claro que as ligas comerciais não são constituídas apenas por Ferro e Carbono, mas podem ter em sua composição outros elementos de liga além de pequenas quantidades de impurezas que são inerentes ao processo de obtenção do material. Assim sendo, o diagrama apresentado na figura 4.1 não

representa fielmente o que sucede na prática, mas como pequenas quantidades de outros elementos não produzem grandes alterações, podemos utilizá-lo como base para o nosso estudo.

O diagrama Ferro-Carbono utilizado na prática, na realidade é um falso diagrama de equilíbrio, isto é, ele representa o equilíbrio metaestável entre Ferro e um Carboneto de Ferro chamado **Cementita** que tem fórmula estequiométrica Fe_3C . O fato é que a forma mais estável da liga Ferro Carbono seria Ferro e Grafita, mas como a grafita pode levar até mesmo anos para se formar, o diagrama estável não possui aplicação prática. A figura 3.14 apresenta o diagrama metaestável Ferro-Cementita.

Em um diagrama de equilíbrio, as fases são sempre representadas por letras gregas, mas no caso das ligas Ferro-Carbono estas fases além de serem identificadas por letras gregas também receberam um nome. Desta forma teremos as fases denominadas ferrita, austenita e cementita, que podem ou não estar presentes na microestrutura do material, dependendo do teor de Carbono e da temperatura.

Observando-se o diagrama nota-se que este apresenta vários pontos que merecem ser destacados. O primeiro deles é o que corresponde a uma composição de 2,11% de Carbono a 1148^0C . Este ponto representa uma fronteira entre as ligas Ferro-Carbono que são caracterizadas como AÇOS e as ligas que são caracterizadas como Ferros Fundidos. Assim, aço é uma liga com menos de 2,11% de Carbono e Ferro Fundido é uma liga com mais 2,11% de Carbono. A escolha deste ponto deve-se ao fato de que, quando resfriamos um aço desde o estado líquido, este sempre passará por uma faixa de temperaturas em que a sua microestrutura será composta de uma única fase chamada **Austenita**, o que não acontece para os Ferros fundidos que possuem teores de Carbono acima deste valor.

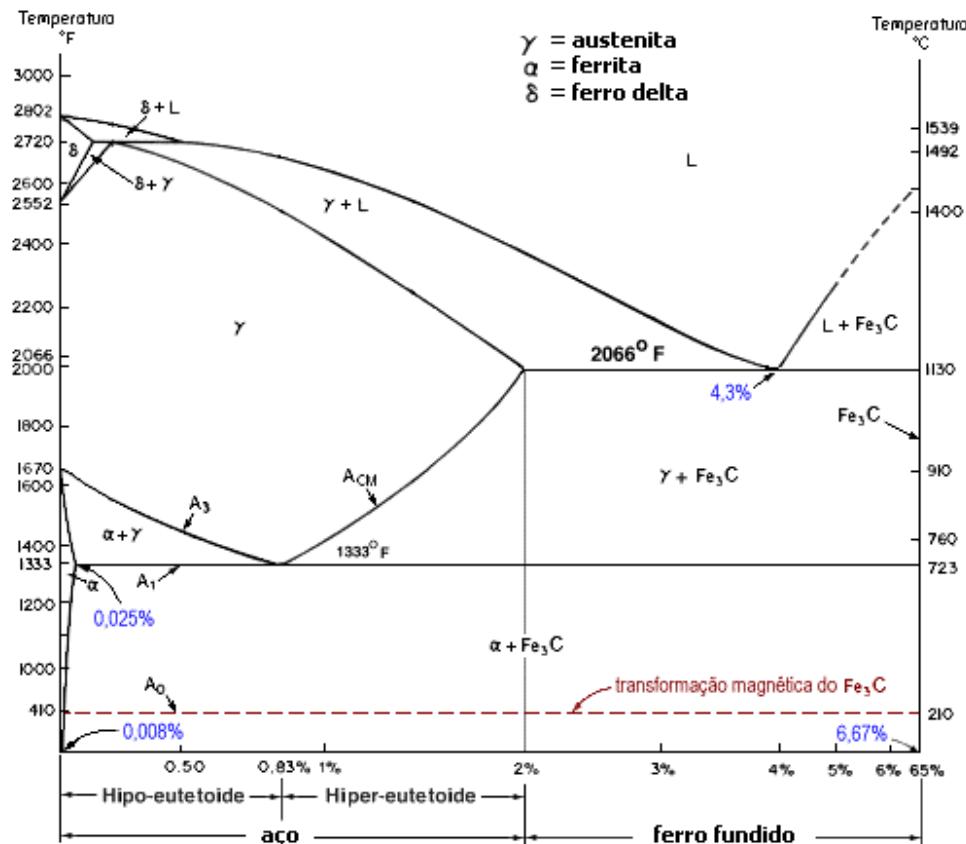


Figura 3.14 – Diagrama de Equilíbrio Ferro-Carbono

A austenita também chamada fase γ , é uma fase derivada do Ferro γ que, como se sabe, é formado por uma estrutura cúbica de faces centradas. Quando combinarmos o Ferro com o Carbono forma-se uma solução sólida intersticial em que é mantida a estrutura cristalina original do Ferro γ .

Para temperaturas inferiores, o fato de o Ferro γ passar para Ferro α produz o aparecimento de uma nova fase chamada *fase α* ou **Ferrita**. A ferrita também é uma solução sólida intersticial de Ferro e Carbono e, a exemplo da fase γ , é mantida a estrutura cristalina cúbica de corpo centrado do Ferro α .

Devido ao fato de que as duas fases citadas acima possuem diferenças em sua estrutura cristalina, existe também uma grande diferença de solubilidade do Carbono entre elas. Como visto anteriormente, os interstícios da estrutura CFC são maiores do que os interstícios da estrutura CCC. Isto conduz a uma solubilidade do Carbono que pode chegar

a 2,11% (aproximadamente 9% em átomos) na temperatura de 1148°C para a austenita e somente 0,025% (aproximadamente 0,1% em átomos) a 723°C para a ferrita.

Conforme o diagrama de fases, a solubilidade do Carbono não é fixa para estas fases, podendo variar com a temperatura. Desta maneira a austenita e a ferrita só apresentarão a sua solubilidade máxima nas temperaturas indicadas acima, variando tanto para temperaturas superiores como para temperaturas inferiores. Além disso, o Carbono é um elemento estabilizador das austenita, e como podemos ver no diagrama, quando tivermos Ferro puro a temperatura mínima em que a austenita é estável é de 912°C mas a medida em que o teor de Carbono cresce esta temperatura vai diminuindo até que, para 0,77% de Carbono chegamos ao mínimo de 723°C. A partir daí a temperatura aumenta novamente até atingirmos o máximo de 2,11% para 1148°C. A ferrita é estável até 912°C na ausência de Carbono e, à medida que aumenta o teor neste elemento, a temperatura diminui até que se atinja a solubilidade máxima de 0,025% a 723°C. Abaixo desta temperatura a solubilidade diminui novamente chegando praticamente a zero na temperatura ambiente.

Como existe um limite de solubilidade do Carbono tanto na austenita quanto na ferrita, o excesso de Carbono poderá propiciar a formação de uma terceira fase que é chamada de **Cementita** e que possui estrutura cristalina ortorrômbica, ainda em solução sólida intersticial com 6,69% de Carbono. Isto acontece para teores de Carbono maiores do que 0,77% acima de 723°C e abaixo de 1148°C e, para teores maiores que 0,025% abaixo de 723°C. Desta maneira, teremos no diagrama regiões em que o aço é monofásico e regiões em que é bifásico. As regiões monofásicas podem ser formadas por ferrita e austenita, enquanto as bifásicas por ferrita e cementita e austenita e cementita. Um ponto importante a ser observado é o ponto eutetóide, com 0,77% de Carbono a 723°C. Neste ponto, temos a existência das três fases mencionadas acima, ou seja, a ferrita, a austenita e a cementita. A partir deste ponto observamos a transformação da austenita em ferrita e cementita.

4- Propriedades Mecânicas dos Aços e as formas de alteração

Principais formas de alteração das propriedades dos aços:

- Soluções Sólidas e formação de Segunda Fase (composição química),
- Tratamentos Térmicos e Tratamentos termomecânicos (transformações de fase / microestruturas, refinamento do grão austenítico),

4.1- Soluções Sólidas e formação de fases e sua relação com o processo siderúrgico:

Aços são definidos como ligas Ferro-Carbono-Manganês, com teor de Carbono de até 2,1%, apresentando ainda elementos residuais como Enxofre e Fósforo. Os aços podem apresentar elementos de liga adicionados a fim de alterar as propriedades conforme a aplicação. A seguir é apresentado um esquema da constituição dos aços.

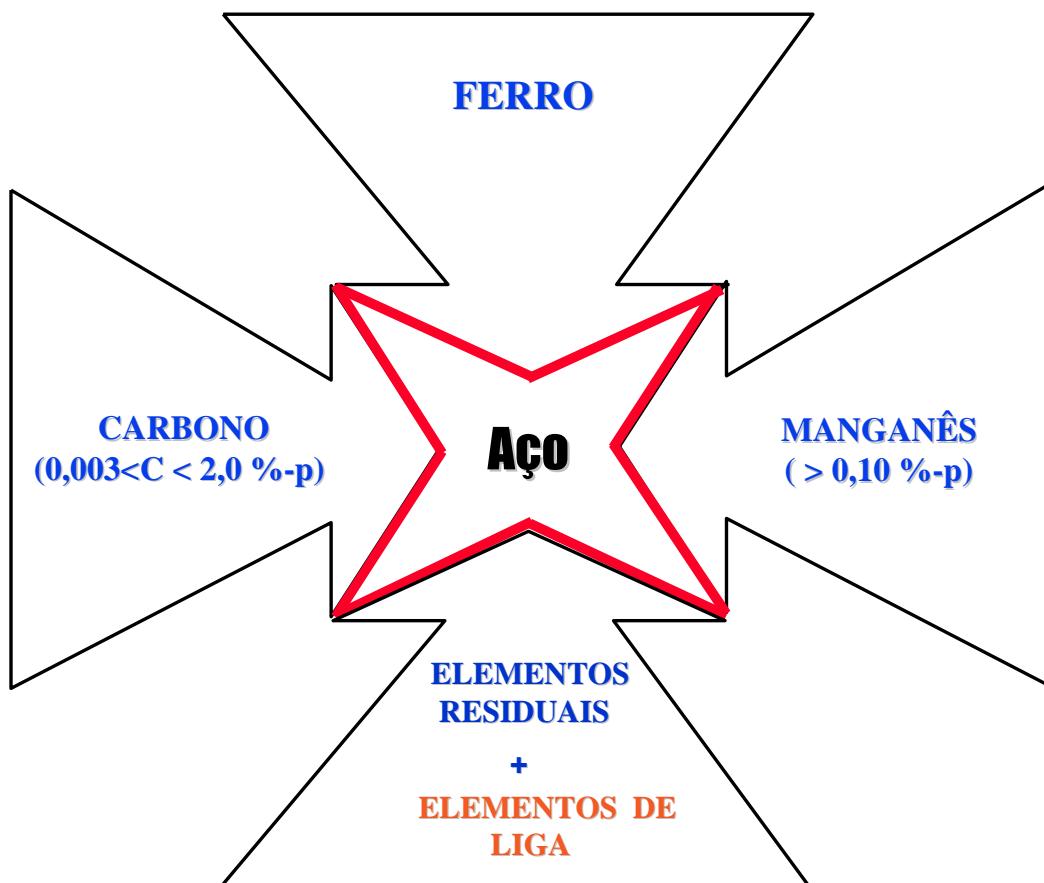


Figura 4.1 - Esquema representando a constituição dos aços.

A composição química é definida dentro do processo siderúrgico na etapa de Aciaria (refino), não podendo ser mais alterada após o lingotamento do aço, a não ser por uma nova fusão do aço. Isto significa que muitas características dos aços são definidas nesta etapa. A mais importante está associada à presença de soluções sólidas e segunda fase, uma vez que o teor de elementos de liga comanda estas possibilidades.

O primeiro efeito da adição de elementos importantes de liga ao aço e que deve ser analisado é o efeito do teor de Carbono sobre as propriedades. É importante observar que o efeito direto da adição de Carbono induz a elevação da dureza e resistência mecânica, com resultado de redução na ductilidade (representada pelo alongamento), figura 4.2.

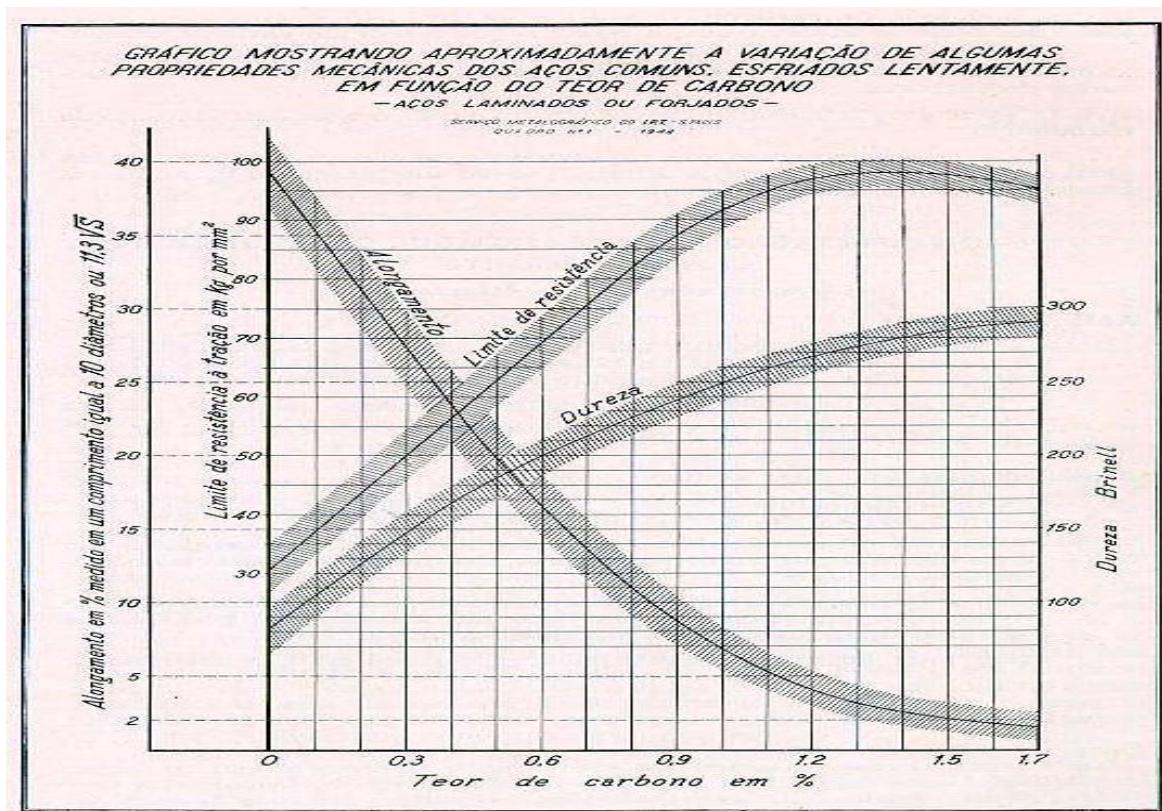
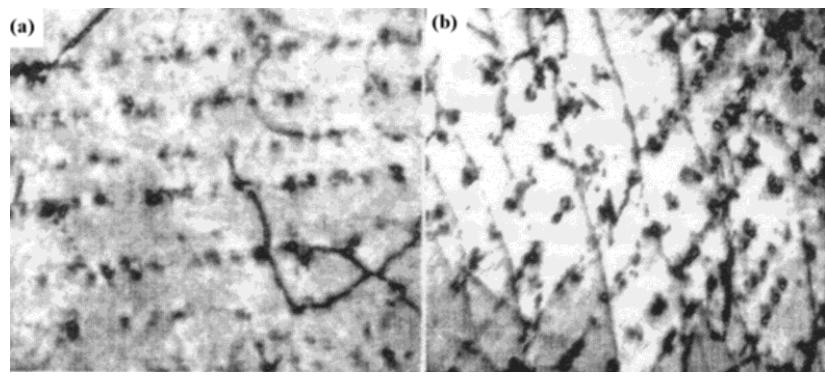


Figura 4.2 - Efeito do teor de Carbono sobre as propriedades mecânicas dos aços.

A composição química está associada de forma direta à formação de soluções sólidas, de forma intersticial com Carbono e Nitrogênio e de forma substitucional com Manganês, Silício, Alumínio e Fósforo. Outro efeito é consequência direta da formação de carbonetos com o Ferro e elementos de liga (Fe_3C / $[Nb,Ti,V]C,N$ / BN / outras).



0,10%C; 0,13%V

~20000x

Figura 4.3 - Micrografia mostrando fina dispersão de carbonetos formados com Vanádio adicionado a um aço.

A seguir são apresentados os efeitos dos principais elementos de liga sobre as propriedades dos aços, considerando a possibilidade de formação de soluções sólidas.

Tabela 4.1 – Relação orientativa do efeito dos elementos de ligas sobre as propriedades dos aços.

Elementos de Liga	LE	LR	Dureza	Along.	Resist. Corrosão
C	↑↑	↑↑↑↑	↑↑↑↑↑	↓↓	↑
Mn	↑	↑	↑	~	-
P	↑↑	↑↑	↑↑	↓	-
S	-	-	-	↓	↓
Si	↑↑	↑↑	↑	↓	-
Al	-	-	-	-	-
Cr	↑	↑	↑	~	↑↑↑↑
Ni	↑	↑	↑	~	↑↑↑↑
Cu	↑↑	↑	↑	~	↑

↑ Aumenta
↓ Diminui
~ Constante
- Não característico

4.2- Tratamentos Térmicos e Tratamentos Termomecânicos (transformações de fase / microestruturas, refinamento do grão) e sua relação com o processo Siderúrgico.

Conforme já discutido no capítulo anterior sobre diagrama de equilíbrio Fe-Fe₃C, podem aparecer diversos tipos de microconstituintes (fases) nos aços, em função dos tratamentos térmicos aplicados. Um exemplo direto é a decomposição da austenita frente a resfriamentos lentos (recozimento) que origina uma mistura de fases composta por ferrita e cementita.

O Ferro é capaz de dissolver, na temperatura ambiente, um teor de Carbono máximo de cerca de 0,008% (fase ferrita). A quantidade que ultrapassa este valor forma uma outra fase junto com o Ferro, denominada cementita. A fase ferrita é macia e dúctil, enquanto a fase cementita é dura e frágil. A quantidade destas e de outras fases presentes, bem como a maneira como se distribuem, formam a chamada “microestrutura”, também influenciando os patamares de resistência mecânica e propriedades demais mecânicas dos aços. As diferenças microestruturais que variam em função do teor de Carbono são apresentadas na figura 4.4.

Em seguida, observamos um mesmo aço, submetido a diferente tratamento termomecânico, figura 4.5.

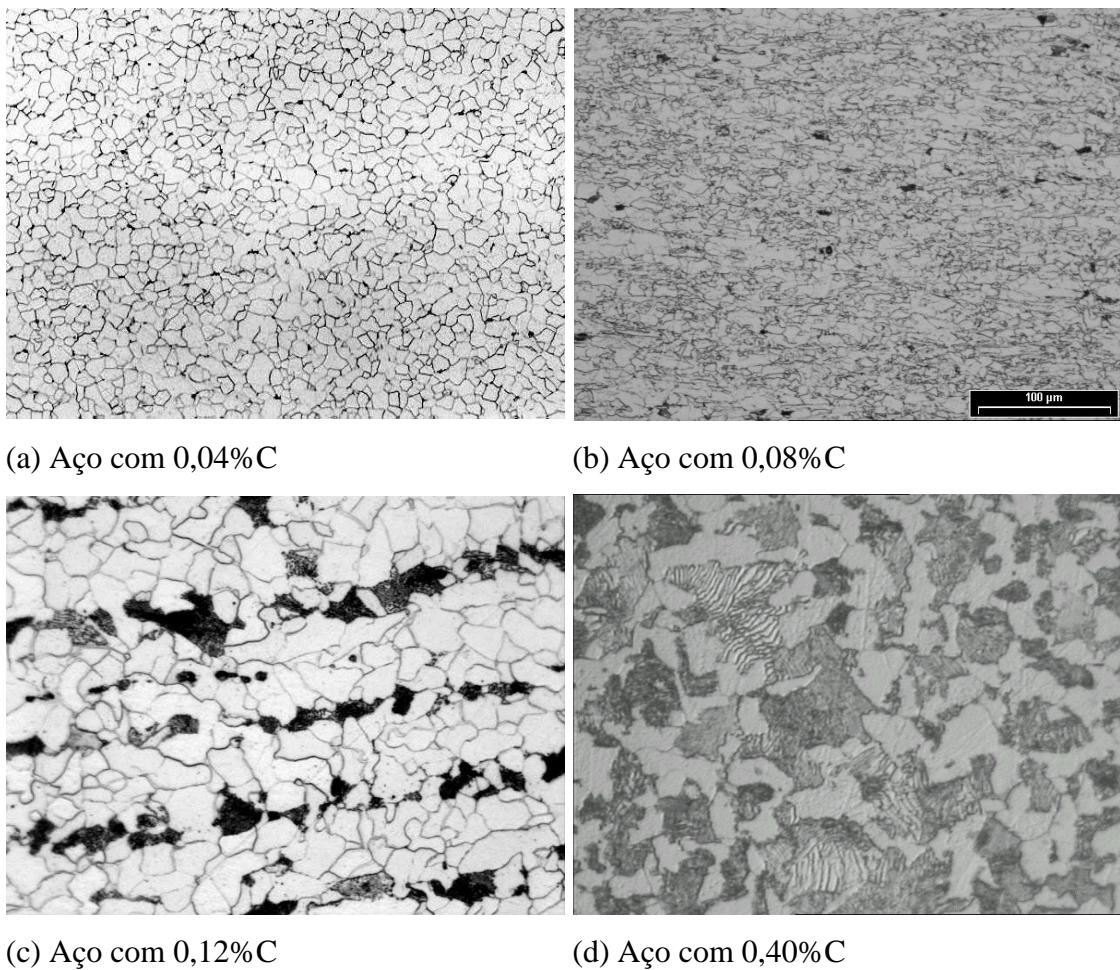


Figura 4.4 - Diferenças microestruturais em função dos diferentes teores de Carbono presentes.

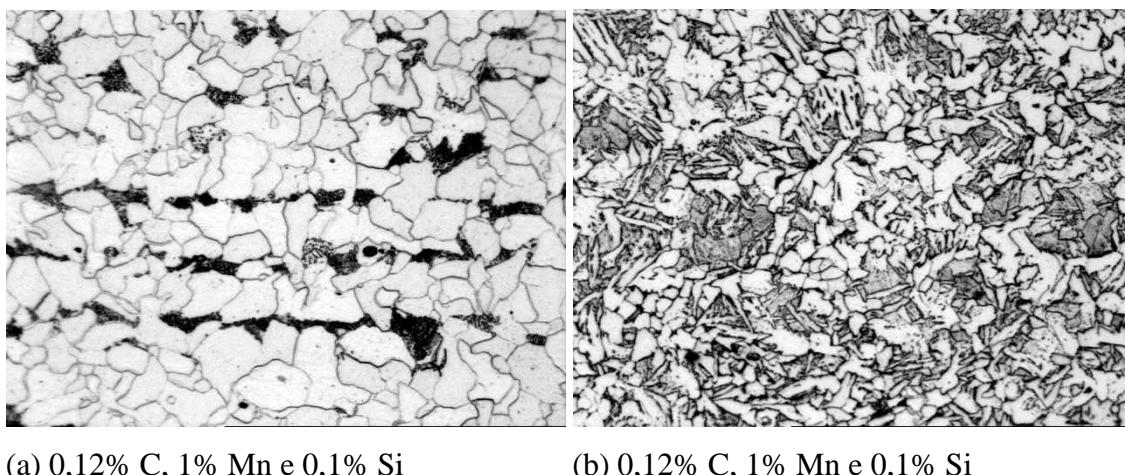


Figura 4.5 - Mesma composição química e diferente processamento termomecânico, que resulta em diferente comportamento mecânico.

O processo termomecânico de laminação a quente, por exemplo, altera a microestrutura do aço, modificando as suas propriedades mecânicas. O processo de laminação a quente convencional é realizado acima da temperatura de transformação de fase ($\gamma \rightarrow \alpha$) - Ar₃. A fase austenita (γ) apresenta estrutura cristalina CFC (cúbica de faces centradas) que leva a necessidade de menores forças para a laminação. A laminação é conduzida em elevada temperatura, pois a resistência à deformação plástica diminui com o aumento da temperatura, figura 4.6 e 4.7. Além disso, nas temperaturas dentro do campo austenítico o material recristaliza e recupera suas propriedades após cada passe de laminação a quente. As diversas recristalizações que ocorrem durante a laminação eliminam a estrutura bruta de fusão, passando a uma estrutura de grãos austeníticos equiaxiais refinados, figura 4.8. O efeito do refinamento de grão reflete no aumento da resistência mecânica dos aços, figura 4.9, conforme equação de Hall-Petch.

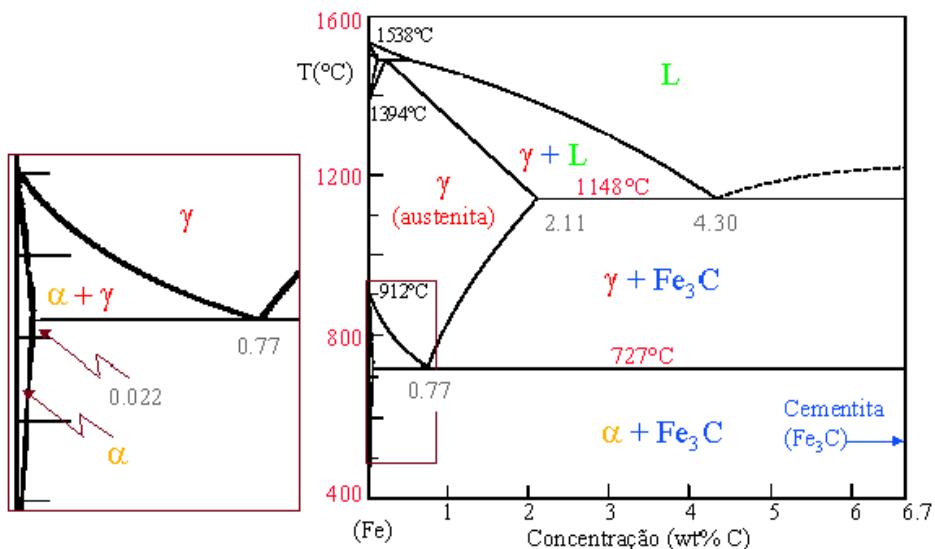


Figura 4.6 - Diagrama Fe-Fe₃C, apresentando corte ampliado da região de laminação de aços baixo e médio Carbono.

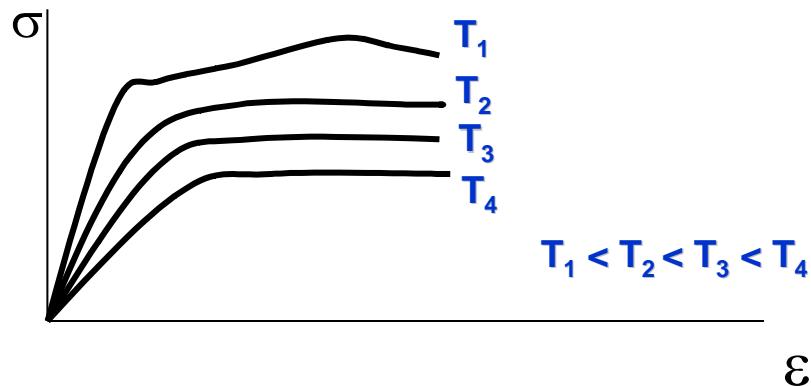


Figura 4.7 - Relação entre a resistência à deformação e a temperatura.

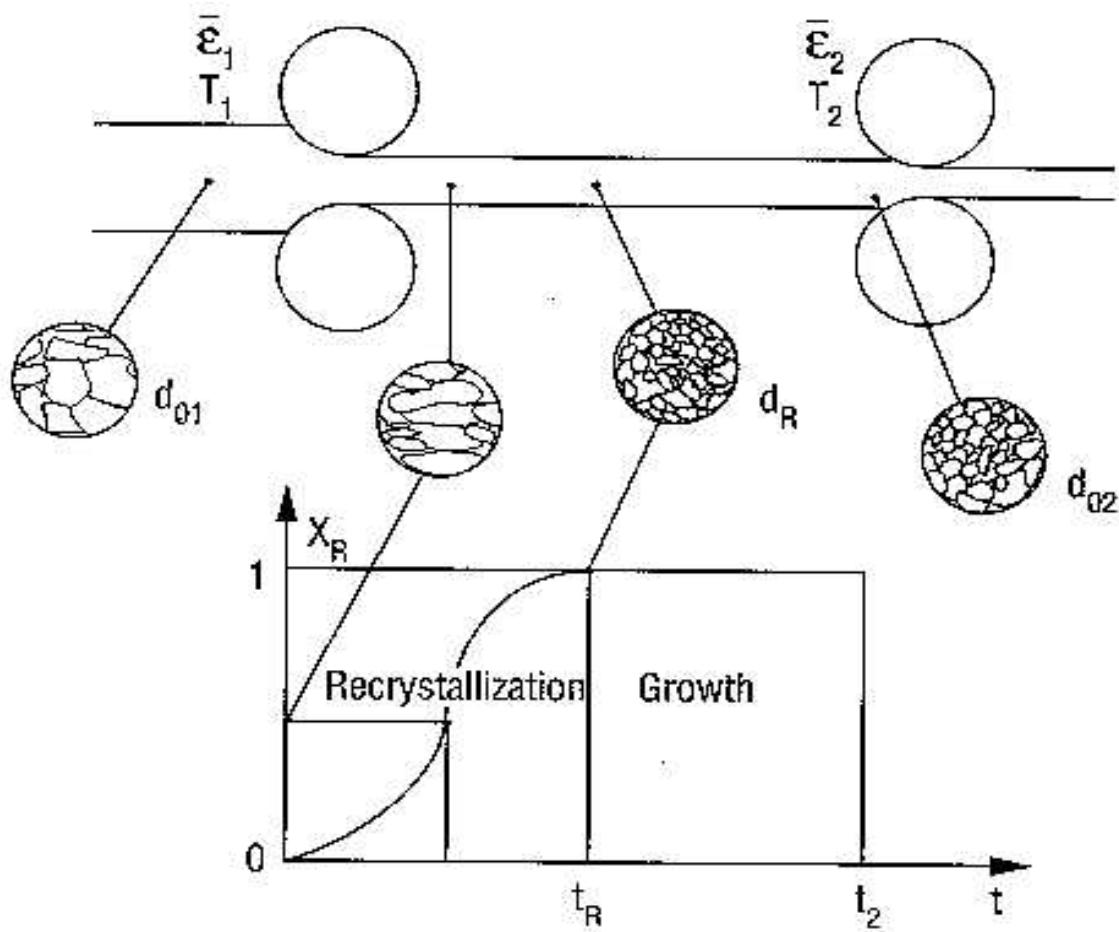
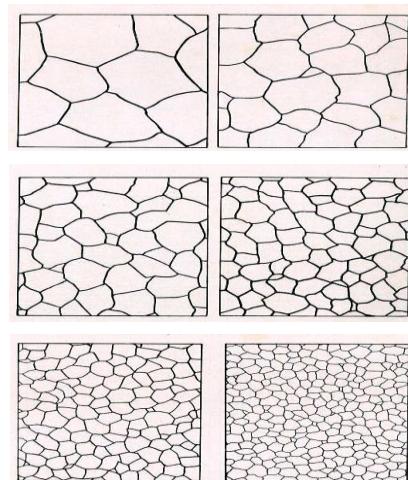


Figura 4.8 - Esquema representando a deformação na laminação a quente, seguida de recristalização e restauração das propriedades.

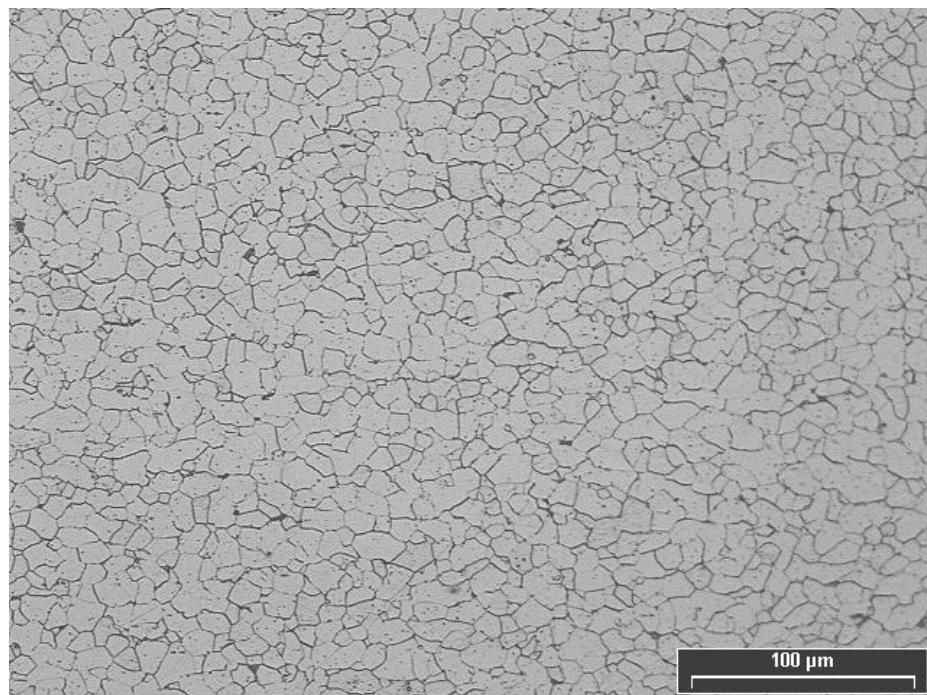


Equação de Hall-Petch:

$$\sigma = k d^{(-1/2)}$$

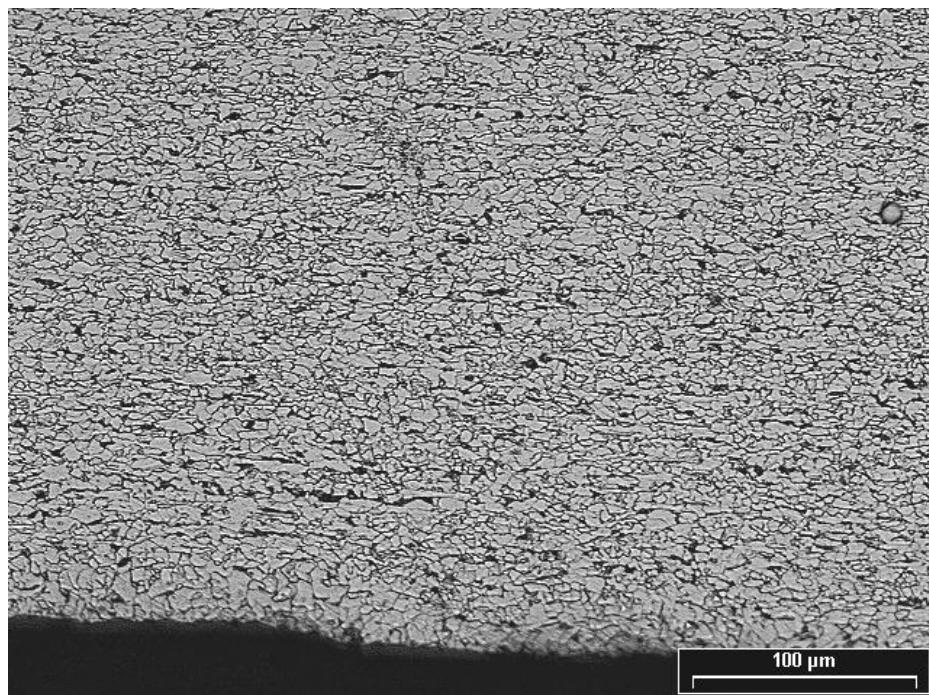
Figura 4.9 - Equação de Hall-Petch, que determina a relação entre o tamanho de grão e a resistência mecânica.

Uma vez que os mecanismos de endurecimento podem atuar juntos (solução sólida, tamanho de grão e segunda fase), o resultado sobre a alteração nas propriedades dos aços pode ser notável, conforme figuras 4.10 e 4.11.



(a) 0,06% C, 0,35% Mn (200X) LE: 180 – 250MPa

Figura 4.10 – Efeito das condições de fabricação dos aços sobre as propriedades mecânicas.



(b) 0,11% C, 1,50% Mn, 0,05% Ti, 0,05% Nb, 0,35% Si (200X) **LE: 500 – 620MPa**

Figura 4.11 – Efeito das condições de fabricação dos aços sobre as propriedades mecânicas.

Os tratamentos térmicos realizados ao final da transformação do aço (laminação) ou em posterior utilização podem promover significativas alterações nas propriedades. Para um determinado aço, devidamente austenitizado, diferentes taxas de resfriamento a partir do campo austenítico promovem a formação das mais variadas microestruturas, desenvolvendo assim propriedades extensamente diferentes. A seguir são apresentados alguns exemplos do efeito do tratamento térmico sobre as propriedades de um aço contendo 0,40% C e 1,50% Mn.

4.2.1 – Diagramas de Resfriamento Contínuo

Neste momento, torna-se importante conhecer os diagramas de Resfriamento Contínuo ou CCT, do inglês Continuous Cooling Transformation. Estes diagramas nos dão um mapa do que acontece quando, através de um resfriamento rápido, levamos a austenita para temperaturas abaixo daquelas de equilíbrio onde a mesma é instável e submetemos o mesmo a resfriamento em que a temperatura decresce continuamente desde a temperatura

de austenitização. Podemos assim, estimar a formação de diferentes microestruturas quando submetemos os aços a resfriamento em tratamentos térmicos, conforme exemplos.

Exemplo 1: Tratamento Térmico de Recozimento Pleno / Normalização.

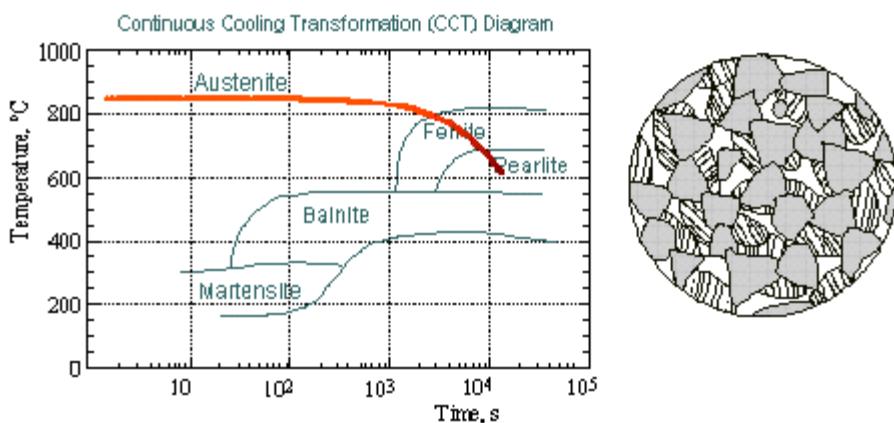


Figura 4.12 - Aço austenitizado em transformação a partir de resfriamento lento. Curva de resfriamento representada pela linha vermelha.

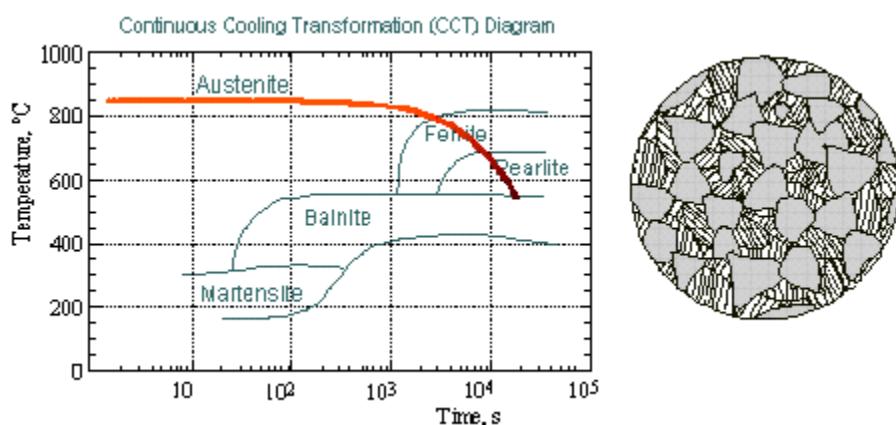


Figura 4.13 - Aço austenitizado transformado a partir de resfriamento lento, mostrando a transformação completa da austenita em ferrita e perlita. Curva de resfriamento representada pela linha vermelha.



Figura 4.14 - Microestrutura mostrando a mistura de fases formada no aço (perlita e ferrita), conforme esquema do exemplo 1, em microscópio ótico. Dureza desenvolvida de 25 - 30 HRC.

Exemplo 2: Tratamento Térmico de Austêmpera.

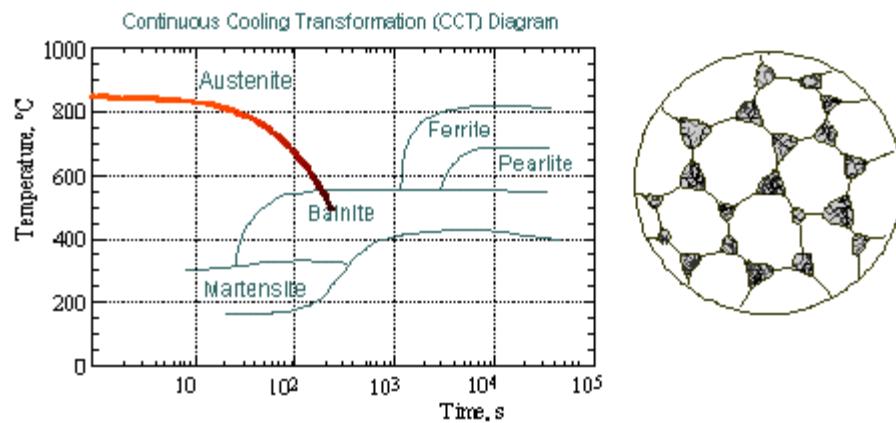


Figura 4.15 - Aço austenitizado em transformação a partir de resfriamento moderado. Curva de resfriamento representada pela linha vermelha.

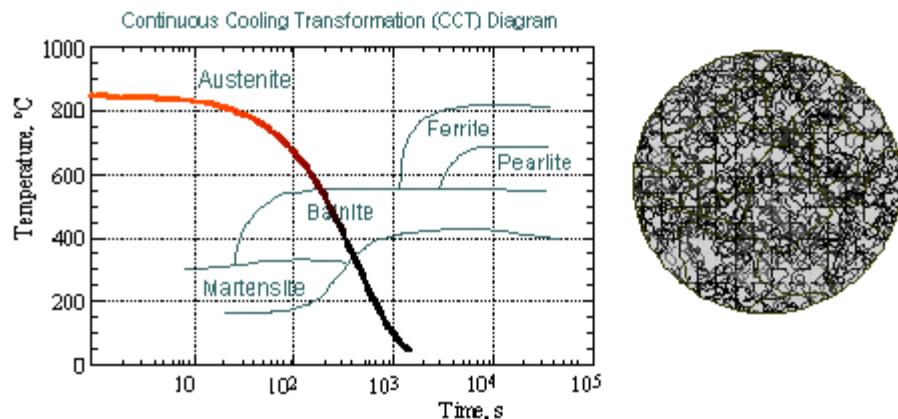


Figura 4.16 - Aço austenitizado transformado a partir de resfriamento moderado, mostrando a transformação completa da austenita em bainita. Curva de resfriamento representada pela linha vermelha.

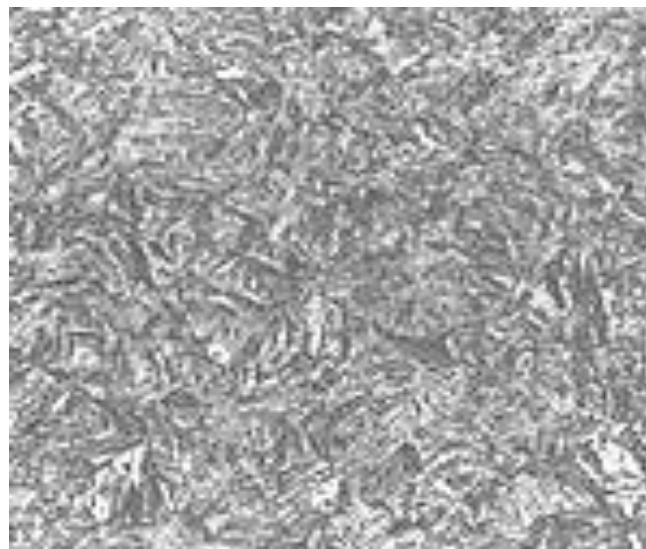


Figura 4.17 - Microestrutura formada no aço (bainita), conforme esquema do exemplo 2, em microscópio ótico. Dureza desenvolvida de 45 - 50 HRC.

Exemplo 3: Tratamento Térmico de Têmpera.

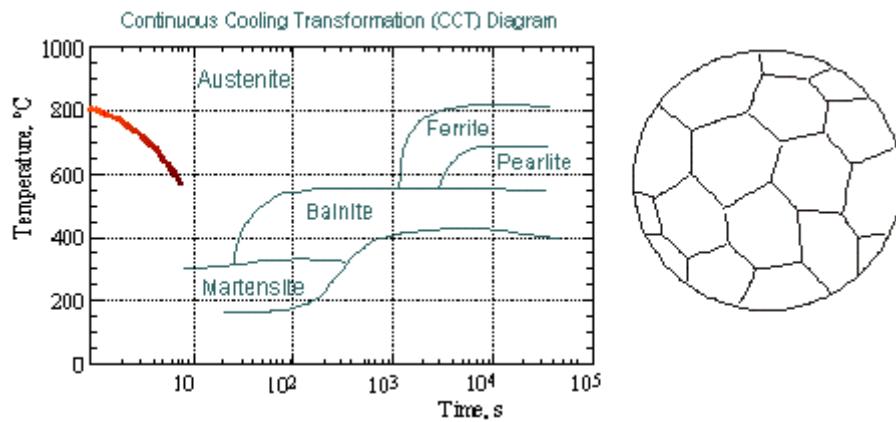


Figura 4.18 - Início do resfriamento, transformação não iniciada. Curva de resfriamento representada pela linha vermelha.

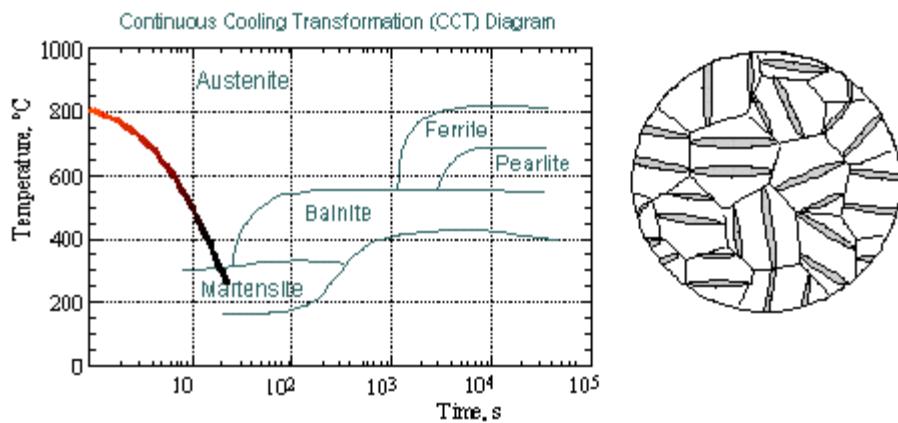


Figura 4.19 - Aço austenitizado em transformação a partir de resfriamento rápido. Curva de resfriamento representada pela linha vermelha.

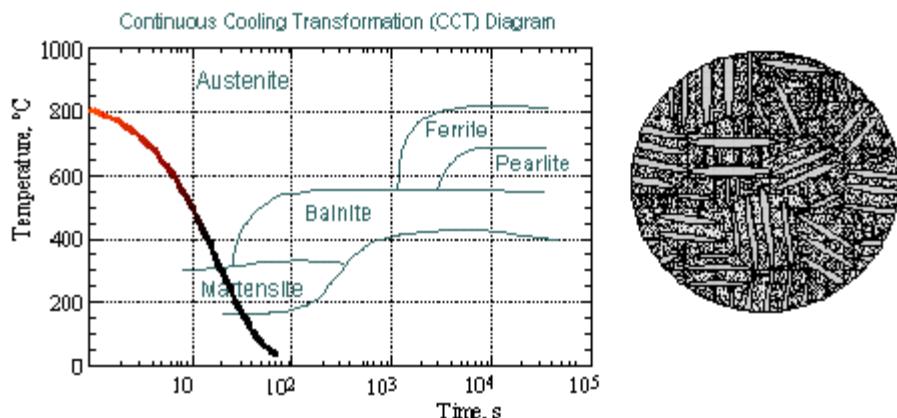


Figura 4.20 - Aço austenitizado transformado a partir de resfriamento rápido, mostrando a transformação completa da austenita em martensita. Curva de resfriamento representada pela linha vermelha.



Figura 4.21 - Microestrutura formada no aço (martensita), conforme esquema do exemplo 3, em microscópio ótico. Dureza desenvolvida de 50 – 55 HRC.

Adicional e finalmente, surge uma última possibilidade de modificação das propriedades mecânicas dos aços pela deformação a frio, que não foi tratada diretamente nos processos de transformação mecânica, considerados até agora a quente, ou acima da temperatura de recristalização. A deformação a frio é realizada, mais frequentemente, em aços de baixo Carbono e elementos de liga e que mantém a sua excelente ductilidade em temperatura ambiente. A deformação a frio, conceitualmente realizada abaixo da temperatura de recristalização, promove o encruamento do material ou, em outras palavras, o endurecimento por deformação a frio. O encruamento promove a elevação na resistência

mecânica e ao escoamento dos aços e é largamente utilizada para a produção de elementos elásticos na engenharia. A Laminação à Frio de chapas de aço pode gerar deformações que chegam à ordem de 90%, dada a natureza dos esforços predominantemente de compressão envolvidos no processo, figura 4.22.

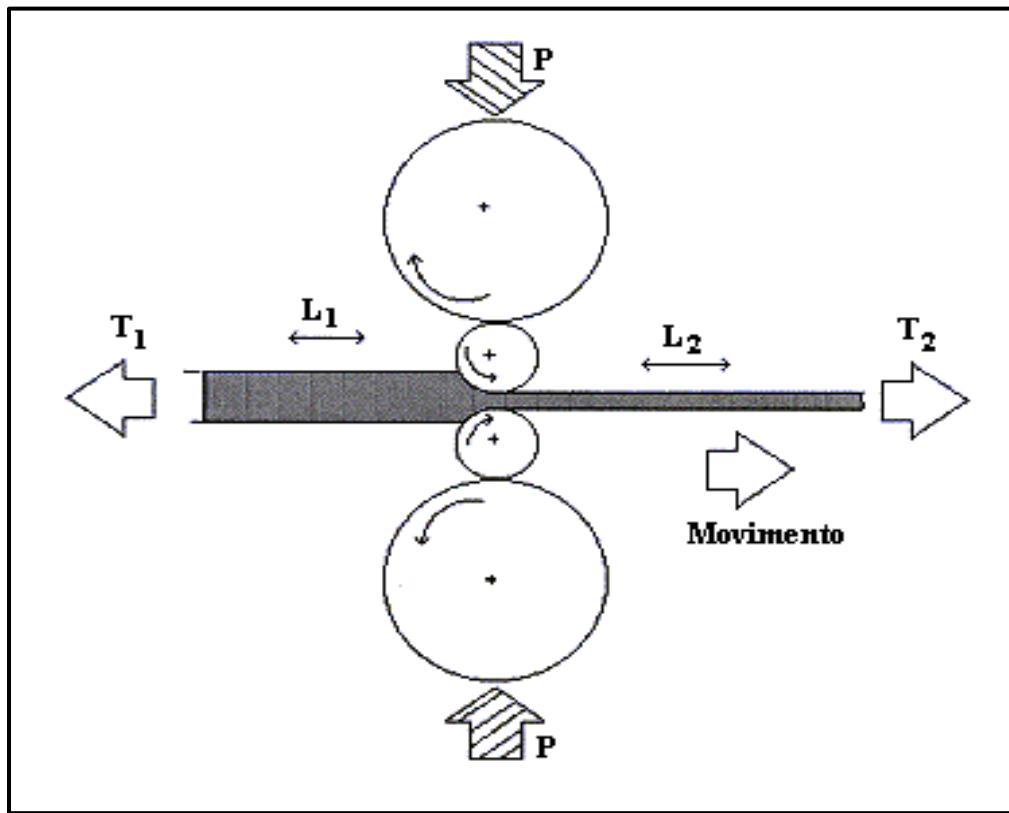


Figura 4.22 - Esquema da laminação a frio de chapas.

Os aços Carbono laminados a frio, ganham resistência mecânica durante o processo de deformação a frio e são, normalmente, recozidos posteriormente. O recozimento pode ser realizado em diferentes temperaturas e, dependendo desta, o material passa por alívio de tensões (recuperação), recozimento envolvendo a recristalização ou ainda recozimento em temperatura mais elevada e que leva ao crescimento de grão. No primeiro, conduzido a baixas temperaturas ($\sim 550^{\circ}\text{C}$), apenas um alívio de tensões é proporcionado, não havendo alteração significativa na microestrutura (forma dos grãos) que permanece inalterada. Quando ultrapassamos a temperatura de recristalização ($\sim 670^{\circ}\text{C}$), o material passa por uma forte reorganização interna, surgindo uma nova microestrutura, de grãos equiaxiais

refinados. Por último, quando o aço é submetido a recristalização em mais elevada temperatura (800°C), além da completa recristalização do material, ocorre rapidamente o crescimento dos grãos, que leva à obtenção de aços laminados com maior estampabilidade final.

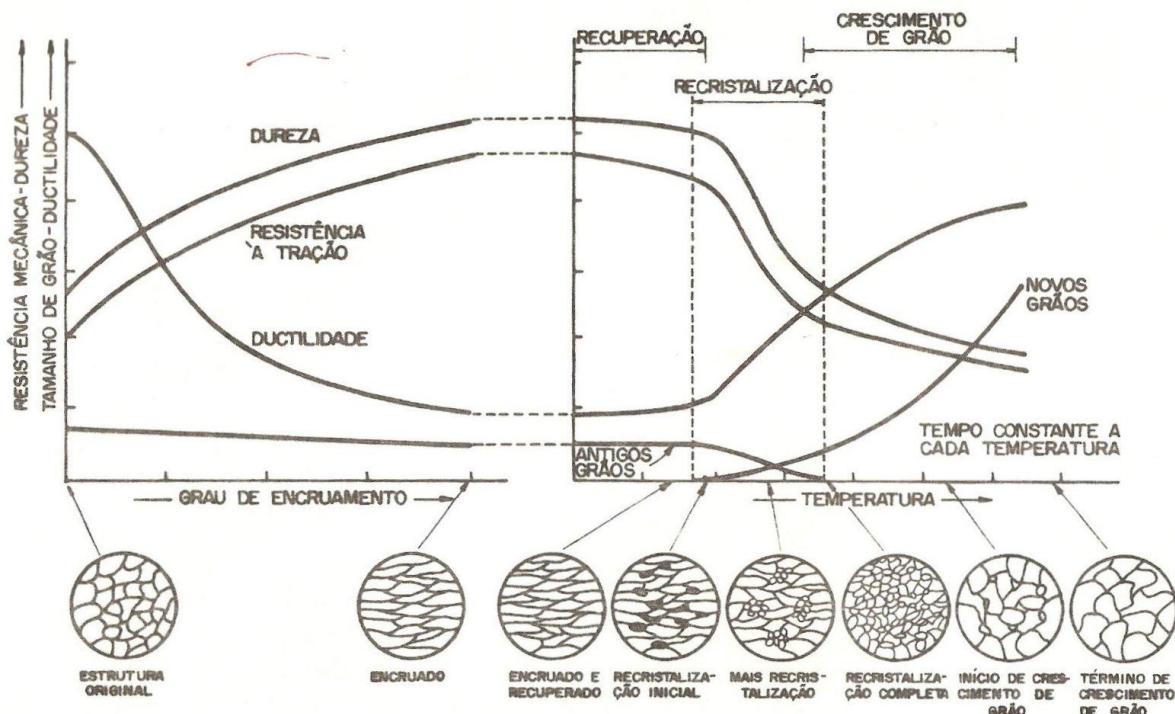


Figura 4.23 – Representação do ciclo **Encruamento x Recristalização** dos aços Carbono.

A partir das análises realizadas podemos entender os principais fatores que afetam as propriedades dos aços e, ao mesmo tempo, correlacionar com os processos de fabricação ou transformação do aço até a sua aplicação final, figura 4.24.

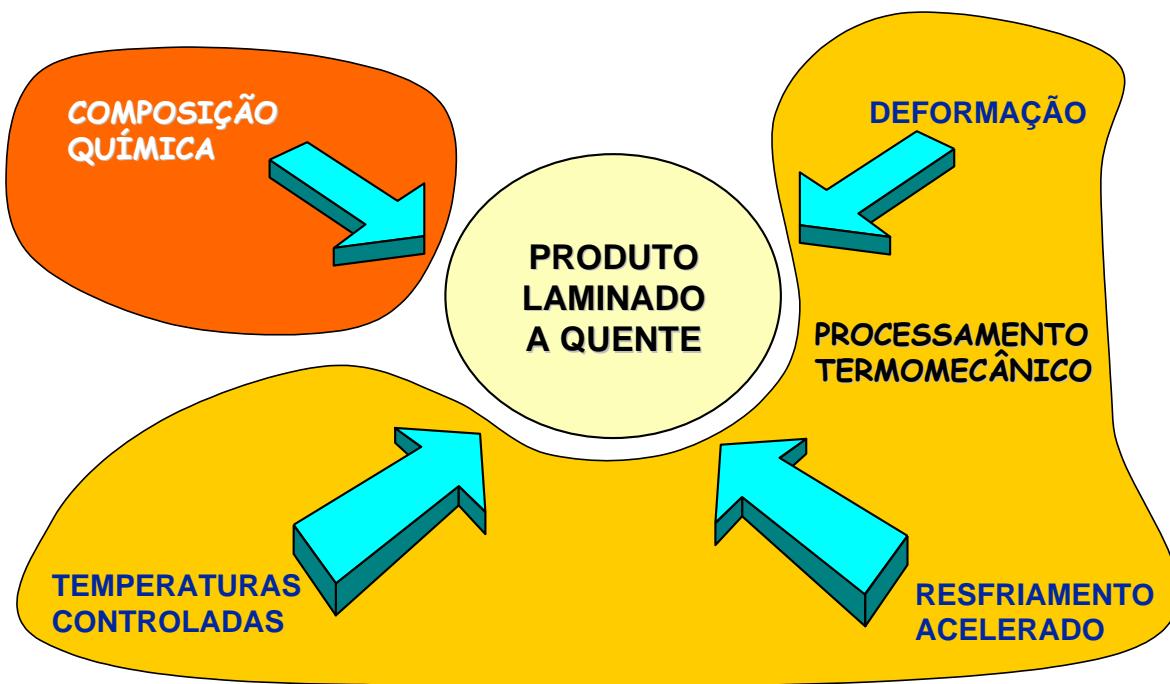


Figura 4.24 - Variáveis importantes na determinação das propriedades dos produtos Laminados a Quente.

5- Classificação de Aços - Aços Carbono, Aços Liga, Aços Ferramenta e Aços Inoxidáveis

Uma das formas mais utilizadas de classificar os aços é aquela que considera a composição química, de acordo com o sistema de designação SAE-AISI (SAE – Society of Automotive Engineers, AISI – American Iron and Steel Institute). A partir desta, podemos classificar globalmente os aços em quatro grandes classes:

- Aços Carbono,
- Aços Liga ou de Construção Mecânica (Baixa e Média Liga),
- Aços Inoxidáveis,
- Aços Ferramenta (Alta Liga).

Os aços Carbono são classificados conforme SAE J403 / Agosto 1995 utilizando um sistema numérico, conforme segue:

5.1- Aços Carbono:

- Aços Simplesmente ao Carbono: SAE/AISI 10XX, onde os dois primeiros algarismos, ou seja, o 10 significa que os aços são simplesmente ao Carbono. A fração XX/100 indica o teor de Carbono em peso presente no aço. Por exemplo, um aço SAE/AISI 1045 é um aço simplesmente ao Carbono, contendo entre 0,43 e 0,50%C em peso e um aço SAE/AISI 1006 é um aço simplesmente ao Carbono, contendo 0,06%C em peso máximo. Estes aços apresentam teor de Manganês que varia entre 0,25 e 1,00%, além de Fósforo e Enxofre com teores máximos de 0,030 e 0,050 respectivamente.

As figuras 5.1 e 5.2 mostram as faixas e limites de composição química para aços Carbono não resulfurados, aplicados aos produtos para forjamento, barras laminadas a quente e fio máquina.

SAE J403 Revised AUG95

(R) TABLE 1—NONRESULFURIZED CARBON STEEL COMPOSITIONS APPLICABLE TO SEMIFINISHED PRODUCTS FOR FORGING, TO HOT ROLLED AND COLD FINISHED BARS, TO WIRE RODS, AND TO SEAMLESS TUBING CAST OR HEAT CHEMICAL RANGES AND LIMITS

UNS No.	SAE/AISI No.	Chemical	Chemical	Chemical	Chemical
		Composition Limits, % ¹	Composition Limits, % ¹	Composition Limits, % ¹	Composition Limits, % ¹
		C	Mn	P, Max	S, Max
G10050	1005	0.06 Max	0.35 Max	0.030	0.050
G10060	1006	0.08 Max	0.25-0.40	0.030	0.050
G10080	1008	0.10 Max	0.30-0.50	0.030	0.050
G10100	1010	0.08-0.13	0.30-0.60	0.030	0.050
G10120	1012	0.10-0.15	0.30-0.60	0.030	0.050
G10150	1015	0.13-0.18	0.30-0.60	0.030	0.050
G10160	1016	0.13-0.18	0.60-0.90	0.030	0.050
G10170	1017	0.15-0.20	0.30-0.60	0.030	0.050
G10180	1018	0.15-0.20	0.60-0.90	0.030	0.050
G10200	1020	0.18-0.23	0.30-0.60	0.030	0.050
G10210	1021	0.18-0.23	0.60-0.90	0.030	0.050
G10220	1022	0.18-0.23	0.70-1.00	0.030	0.050
G10230	1023	0.20-0.25	0.30-0.60	0.030	0.050
G10250	1025	0.22-0.28	0.30-0.60	0.030	0.050
G10260	1026	0.22-0.28	0.60-0.90	0.030	0.050
G10290	1029	0.25-0.31	0.60-0.90	0.030	0.050
G10300	1030	0.28-0.34	0.60-0.90	0.030	0.050
G10350	1035	0.32-0.38	0.60-0.90	0.030	0.050
G10380	1038	0.35-0.42	0.60-0.90	0.030	0.050
G10390	1039	0.37-0.44	0.70-1.00	0.030	0.050
G10400	1040	0.37-0.44	0.60-0.90	0.030	0.050
G10420	1042	0.40-0.47	0.60-0.90	0.030	0.050
G10430	1043	0.40-0.47	0.70-1.00	0.030	0.050
G10440	1044	0.43-0.50	0.30-0.60	0.030	0.050
G10450	1045	0.43-0.50	0.60-0.90	0.030	0.050
G10460	1046	0.43-0.50	0.70-1.00	0.030	0.050
G10490	1049	0.46-0.53	0.60-0.90	0.030	0.050
G10500	1050	0.48-0.55	0.60-0.90	0.030	0.050
G10530	1053	0.48-0.55	0.70-1.00	0.030	0.050
G10550	1055	0.50-0.60	0.60-0.90	0.030	0.050
G10600	1060	0.55-0.65	0.60-0.90	0.030	0.050
G10650	1065	0.60-0.70	0.60-0.90	0.030	0.050
G10700	1070	0.65-0.75	0.60-0.90	0.030	0.050

Continued on next page

Figura 5.1 – Composição química dos aços Carbono, conforme SAE J403.

SAE J403 Revised AUG95

(R) TABLE 1—NONRESULFURIZED CARBON STEEL COMPOSITIONS APPLICABLE TO SEMIFINISHED PRODUCTS FOR FORGING, TO HOT ROLLED AND COLD FINISHED BARS, TO WIRE RODS, AND TO SEAMLESS TUBING CAST OR HEAT CHEMICAL RANGES AND LIMITS (CONTINUED)

UNS No.	SAE/AISI No.	Chemical	Chemical	Chemical	Chemical
		Composition Limits, % ¹	Composition Limits, % ¹	Composition Limits, % ¹	Composition Limits, % ¹
		C	Mn	P, Max	S, Max
G10780	1078	0.72-0.85	0.30-0.60	0.030	0.050
G10800	1080	0.75-0.88	0.60-0.90	0.030	0.050
G10860	1086	0.80-0.93	0.30-0.50	0.030	0.050
G10900	1090	0.85-0.98	0.60-0.90	0.030	0.050
G10950	1095	0.90-1.03	0.30-0.50	0.030	0.050

NOTES—LEAD—Standard carbon steels can be produced with a lead range of 0.15 to 0.35% to improve machinability. Such steels are identified by inserting the letter "L" between the second and third numerals of the grade number, for example, 10L45. The UNS designation is also modified by changing the last digit to "4" to indicate lead, for example, G10454.

BORON—Standard killed carbon steels, which are fine grain, may be produced with a boron addition to improve hardenability. Such steels are produced to a range of 0.0005 to 0.003% boron. These steels are identified by inserting the letter "B" between the second and third numerals of the grade number, for example, 10B46. The UNS designation is also modified by changing the last digit to "1" to indicate boron, for example, G10461.

COPPER—When copper is required, 0.20% minimum is generally specified.

SILICON—BARS AND SEMIFINISHED—When silicon ranges or limits are required, the following ranges are commonly used: 0.10% max; 0.10 to 0.20%; 0.15 to 0.35%; 0.20 to 0.40%; or 0.30 to 0.60%.

RODS—When silicon is required, the following ranges and limits are commonly used for nonresulfurized steels: 0.10% max; 0.07 to 0.15%; 0.10 to 0.20%; 0.15 to 0.35%; 0.20 to 0.40%; 0.30 to 0.60%.

ADDITIONAL ELEMENTS—See Section 3 for additional elements to be reported.

¹ Certain qualities and commodities are customarily produced to lower limits of phosphorus and sulfur. (See SAE J411, Table 1.)

Figura 5.2 – Composição química dos aços Carbono, conforme SAE J403.

- Aços Carbono para Estruturas e Soldagem: SAE/AISI 10XX, onde a mesma designação anterior é utilizada para representar o teor de Carbono, entretanto, são aços que apresentam teor de Enxofre mais baixo a fim de gerar uma menor fração volumétrica de inclusões de sulfetos. Estes aços apresentam teor de Manganês que varia entre 0,30 e 1,00%, além de Fósforo e Enxofre com teores máximos de 0,030 e **0,035** respectivamente. A figura 5.3 apresenta a composição química para aços Carbono aplicável a formas estruturais de aços Carbono, tais como placas, tiras, chapas e tubos soldados, conforme SAE J403.

SAE J403 Revised AUG95

(R) TABLE 4—CARBON STEEL COMPOSITIONS APPLICABLE ONLY TO STRUCTURAL SHAPES, PLATES, STRIP, SHEETS, AND WELDED TUBING

UNS No.	SAE/AISI No.	Cast or Heat	Cast or Heat	Cast or Heat	Cast or Heat
		Chemical Composition	Chemical Composition	Chemical Composition	Chemical Composition
		Limits, %	Limits, %	Limits, %	Limits, %
		C	Mn	P, Max ¹	S, Max ¹
G10060	1006	0.08 Max	0.45 Max	0.030	0.035
G10080	1008	0.10 Max	0.50 Max	0.030	0.035
G10090	1009	0.15 Max	0.60 Max	0.030	0.035
G10100	1010	0.08-0.13	0.30-0.60	0.030	0.035
G10120	1012	0.10-0.15	0.30-0.60	0.030	0.035
G10150	1015	0.12-0.18	0.30-0.60	0.030	0.035
G10160	1016	0.12-0.18	0.60-0.90	0.030	0.035
G10170	1017	0.14-0.20	0.30-0.60	0.030	0.035
G10180	1018	0.14-0.20	0.60-0.90	0.030	0.035
G10190	1019	0.14-0.20	0.70-1.00	0.030	0.035
G10200	1020	0.17-0.23	0.30-0.60	0.030	0.035
G10210	1021	0.17-0.23	0.60-0.90	0.030	0.035
G10220	1022	0.17-0.23	0.70-1.00	0.030	0.035
G10230	1023	0.19-0.25	0.30-0.60	0.030	0.035
G10250	1025	0.22-0.28	0.30-0.60	0.030	0.035
G10260	1026	0.22-0.28	0.60-0.90	0.030	0.035
G10300	1030	0.27-0.34	0.60-0.90	0.030	0.035
G10330	1033	0.29-0.36	0.70-1.00	0.030	0.035
G10350	1035	0.31-0.38	0.60-0.90	0.030	0.035
G10370	1037	0.31-0.38	0.70-1.00	0.030	0.035
G10380	1038	0.34-0.42	0.60-0.90	0.030	0.035
G10390	1039	0.36-0.44	0.70-1.00	0.030	0.035
G10400	1040	0.36-0.44	0.60-0.90	0.030	0.035
G10420	1042	0.39-0.47	0.60-0.90	0.030	0.035
G10430	1043	0.39-0.47	0.70-1.00	0.030	0.035
G10450	1045	0.42-0.50	0.60-0.90	0.030	0.035
G10460	1046	0.42-0.50	0.70-1.00	0.030	0.035
G10490	1049	0.45-0.53	0.60-0.90	0.030	0.035
G10500	1050	0.47-0.55	0.60-0.90	0.030	0.035
G10550	1055	0.52-0.60	0.60-0.90	0.030	0.035
G10600	1060	0.55-0.66	0.60-0.90	0.030	0.035
G10650	1065	0.59-0.70	0.60-0.90	0.030	0.035
G10700	1070	0.65-0.76	0.60-0.90	0.030	0.035
G10740	1074	0.69-0.80	0.50-0.80	0.030	0.035
G10750	1075	0.69-0.80	0.40-0.70	0.030	0.035
G10780	1078	0.72-0.86	0.30-0.60	0.030	0.035
G10800	1080	0.74-0.88	0.60-0.90	0.030	0.035
G10840	1084	0.80-0.94	0.60-0.90	0.030	0.035
G10850	1085	0.80-0.94	0.70-1.00	0.030	0.035
G10860	1086	0.80-0.94	0.30-0.50	0.030	0.035
G10900	1090	0.84-0.98	0.60-0.90	0.030	0.035
G10950	1095	0.90-1.04	0.30-0.50	0.030	0.035

NOTE—SILICON—Where silicon is requested, the following ranges and limits are commonly used:

Up to 1025, incl. 0.10 Max, 0.10-0.25 or 0.15-0.35

Over 1025 0.10-0.25 or 0.15-0.35

ADDITIONAL ELEMENTS—See Section 3 for additional elements to be reported.

¹ For structural shapes and plates P, Max 0.035, S, Max .04. For welded tubing P, Max 0.035, sulfur 0.035. Limits based on changes of ASTM Committee A01 Steel specifications which include but are not limited to A 366, 513, 559, and 830.

Figura 5.3 – Composição química dos aços Carbono, conforme SAE J403.

- Aços Carbono Ressulfurados ou de Usinagem Fácil: SAE/AISI 11XX, onde os dois primeiros algarismos, ou seja, o 11 significa que os aços em questão são ao Carbono e apresentam teor de Enxofre mais elevado em relação às subclasses anteriores. A fração XX/100 indica o teor de Carbono em peso presente no aço. Por exemplo, um aço SAE/AISI 1137 é um aço Carbono ressulfurado, contendo 0,32 à 0,39% C e um aço SAE/AISI 1117 é um aço ressulfurado ao Carbono, contendo 0,14 à 0,20% C em peso. Estes aços apresentam teor de Manganês que varia entre 0,70 e 1,65%, além de Fósforo com teor máximo de 0,030% e Enxofre que varia desde 0,08 até 0,33%. São aços de usinagem fácil, uma vez que o mais elevado teor de Enxofre promove maior fração volumétrica de inclusões de sulfetos, que facilitam a quebra do cavaco.

- Aços Carbono Ressulfurados e Refosforados: SAE/AISI 12XX, onde os dois primeiros algarismos, ou seja, o 12 significa que os aços em questão são ao Carbono e apresentam teor de Enxofre e Fósforo mais elevado em relação às subclasses anteriores. A fração XX/100 indica o teor de Carbono em peso presente no aço. Por exemplo, um aço SAE/AISI 1212 é um aço Carbono ressulfurado e refosforado, contendo 0,12% C e um teor mais elevado de Enxofre e Fósforo apresentando, respectivamente, faixas de 0,07 a 0,12% e 0,16 a 0,23%. O aço SAE/AISI 1215 é um aço ressulfurado e refosforado ao Carbono, contendo 0,15% C em peso e um teor mais elevado de Enxofre e Fósforo apresentando, respectivamente, faixas de 0,04 a 0,09% e 0,26 a 0,35%. Estes aços são também referidos na literatura como aços de usinagem fácil, uma vez que o mais elevado teor de Enxofre e Fósforo promovem maior fração volumétrica de inclusões de sulfetos e fosfetos, que facilitam a quebra do cavaco.

A figura 5.4 apresenta a composição química para os aços Carbono ressulfurados e ressulfurados e refosforados, também referidos como de usinagem fácil, aplicável a produtos para forjamento, barras laminadas a quente e fio máquina, conforme SAE J403.

SAE J403 Revised AUG95

(R) TABLE 3A—FREE CUTTING CARBON STEEL COMPOSITIONS APPLICABLE TO SEMIFINISHED PRODUCTS FOR FORGING, HOT ROLLED AND COLD FINISHED BARS, WIRE RODS, AND SEAMLESS TUBING—RESULFURIZED CARBON STEELS CAST OR HEAT CHEMICAL RANGES AND LIMITS

UNS No.	SAE/AISI No.	Chemical	Chemical	Chemical	Chemical
		Composition Limits, % C	Composition Limits, % Mn	Composition Limits, % P, Max	Composition Limits, % S, Max
G11170	1117	0.14-0.20	1.00-1.30	0.030	0.08-0.13
G11180	1118	0.14-0.20	1.30-1.60	0.030	0.08-0.13
G11370	1137	0.32-0.39	1.35-1.65	0.030	0.08-0.13
G11400	1140	0.37-0.44	0.70-1.00	0.030	0.08-0.13
G11410	1141	0.37-0.45	1.35-1.65	0.030	0.08-0.13
G11440	1144	0.40-0.48	1.35-1.65	0.030	0.24-0.33
G11460	1146	0.42-0.49	0.70-1.00	0.030	0.08-0.13

NOTES—LEAD—See footnote under Table 1.

SILICON—Bars and Semifinished—See footnote under Table 1.

RCDS—When silicon is required, the following ranges and limits are commonly used: 0.10 Max, 0.10-0.20 or 0.15-0.35

ADDITIONAL ELEMENTS—See Section 3 for additional elements to be reported.

(R) TABLE 3B—FREE CUTTING CARBON STEEL COMPOSITIONS APPLICABLE TO SEMIFINISHED PRODUCTS FOR FORGING, HOT ROLLED AND COLD FINISHED BARS, WIRE RODS, AND SEAMLESS TUBING—REPHOSPHORIZING AND RESULFURIZED CARBON STEELS CAST OR HEAT CHEMICAL RANGES AND LIMITS

UNS No.	SAE/AISI No.	Chemical	Chemical	Chemical	Chemical	Chemical
		Composition Limits, % C, Max	Composition Limits, % Mn	Composition Limits, % P	Composition Limits, % S	Composition Limits, % Pb
G12120	1212	0.13	0.70-1.00	0.07-0.12	0.16-0.23	—
G12130	1213	0.13	0.70-1.00	0.07-0.12	0.24-0.33	—
G12150	1215	0.09	0.75-1.05	0.04-0.09	0.26-0.35	—
G12144	1214	0.15	0.85-1.15	0.04-0.09	0.26-0.35	0.15-0.35

NOTES—LEAD—See footnote under Table 1.

SILICON—It is not common practice to produce the 12xx series of steels to specified silicon because of its adverse effect on machinability.

ADDITIONAL ELEMENTS—See Section 3 for additional elements to be reported.

Figura 5.4 – Composição química dos aços Carbono ressulfurados e ressulfurados e refosforados, conforme SAE J403.

- **Aços Carbono Alto Manganês:** SAE/AISI 15XX, onde os dois primeiros algarismos, ou seja, o 15 significa que os aços são simplesmente ao Carbono com alto Manganês. A fração XX/100 indica o teor de Carbono em peso presente no aço. Por exemplo, um aço SAE/AISI 1541 é um aço simplesmente ao Carbono, contendo entre 0,36 e 0,44% C em peso e teor de Manganês de 1,35 até 1,65% e um aço SAE/AISI 1522 é um aço simplesmente ao Carbono, contendo entre 0,18 e 0,24% C em peso e teor de Manganês

1,10 a 1,40%. Estes aços apresentam teor de Manganês que varia entre 0,85 e 1,65%, além de Fósforo e Enxofre com teores máximos de 0,030 e 0,050 respectivamente. O maior teor de Manganês confere a esta subclasse maior resistência mecânica e limite de escoamento.

As figuras 5.5 e 5.6 apresentam a composição química para os aços Carbono alto Manganês, aplicável a produtos para forjamento, barras laminadas a quente e fio máquina, bem como a produtos soldados, conforme SAE J403.

SAE J403 Revised AUG95

(R) TABLE 2—HIGH MANGANESE CARBON STEEL COMPOSITIONS AVAILABLE ONLY TO SEMIFINISHED PRODUCTS FOR FORGING, TO HOT ROLLED AND COLD FINISHED BARS, AND TO SEAMLESS TUBING CAST OR HEAT CHEMICAL RANGES AND LIMITS

UNS No.	SAE/AISI No.	Chemical	Chemical	Chemical	Chemical
		Composition Limits, % C	Composition Limits, % Mn	Composition Limits, % P, Max	Composition Limits, % S, Max
G15220	1522	0.18-0.24	1.10-1.40	0.030	0.050
G15240	1524	0.19-0.25	1.35-1.65	0.030	0.050
G15260	1526	0.22-0.29	1.10-1.40	0.030	0.050
G15270	1527	0.22-0.29	1.20-1.50	0.030	0.050
G15410	1541	0.36-0.44	1.35-1.65	0.030	0.050
G15480	1548	0.44-0.52	1.10-1.40	0.030	0.050
G15520	1552	0.47-0.55	1.20-1.50	0.030	0.050
G15660	1566	0.60-0.71	0.85-1.15	0.030	0.050

NOTES—LEAD—See footnote under Table 1.

BORON—See footnote under Table 1.

PHOSPHORUS AND SULFUR—See footnote under Table 1.

SILICON—See footnote under Table 1.

ADDITIONAL ELEMENTS—See Section 3 for additional elements to be reported.

Chemical analyses of additional high-manganese steels produced to hardenability requirements are shown in SAE J1268 and SAE J1868.

Figura 5.5 – Composição química dos aços alto Manganês, conforme SAE J403.

(R) TABLE 5—HIGH MANGANESE CARBON STEEL COMPOSITIONS APPLICABLE ONLY TO STRUCTURAL SHAPES, PLATES, STRIP, SHEETS, AND WELDED TUBING

UNS No.	SAE/AISI No.	Cast or Heat Chemical Composition Limits, %	Former SAE No.			
		C	Mn	P, Max ¹	S, Max ¹	
G15240	1524	0.18-0.25	1.30-1.65	0.030	0.035	1024
G15270	1527	0.22-0.29	1.20-1.55	0.030	0.035	1027
G15360	1536	0.30-0.38	1.20-1.55	0.030	0.035	1036
G15410	1541	0.36-0.45	1.30-1.65	0.030	0.035	1041
G15480	1548	0.43-0.52	1.05-1.40	0.030	0.035	1048
G15520	1552	0.46-0.55	1.20-1.55	0.030	0.035	1052

NOTE—SILICON—When silicon ranges or limits are required, the values shown in Table 4 apply.

ADDITIONAL ELEMENTS—See Section 3 for additional elements to be reported.

¹ For structural shapes and plates P, Max, 0.035, S, Max 0.04. For welded tubing P, Max 0.035, sulfur 0.035. Limits based on changes of ASTM Committee A01 Steel specifications which include but are not limited to A 366, 513, 659, and 830.

Figura 5.6 – Composição química dos aços alto Manganês, aplicada somente às formas estruturais como placas, tiras, chapas e tubos soldados, conforme SAE J403.

5.2- Aços Liga ou de Construção Mecânica (Baixa e Média Liga):

Os aços liga são designados por diversas séries representadas numericamente com quatro dígitos, onde os dois primeiros algarismos indicam os principais elementos de liga adicionados e a fração dos dois últimos dígitos “XX/100” indica o teor de Carbono em peso presente no aço. Os principais elementos de liga presentes nestes aços são: Cromo, Níquel, Molibdênio, Vanádio. A figura 5.7 apresenta as principais composições químicas dos aços liga, conforme SAE J404 e, em seguida, serão comentadas as séries mais usuais dentro desta classe de aços.

SAE J404 Revised APR94

(R) TABLE 1A—ALLOY STEEL COMPOSITIONS¹

UNS No.	SAE No.	Ladle Chemical Composition Limits, % C	Ladle Chemical Composition Limits, % Mn	Ladle Chemical Composition Limits, % P	Ladle Chemical Composition Limits, % S	Ladle Chemical Composition Limits, % Si	Ladle Chemical Composition Limits, % Ni	Ladle Chemical Composition Limits, % Cr	Ladle Chemical Composition Limits, % Mo	Ladle Chemical Composition Limits, % V
G13350	1335	0.33-0.38	1.60-1.90	0.030	0.040	0.15-0.25	—	—	—	—
G13400	1340	0.38-0.43	1.60-1.90	0.030	0.040	0.15-0.35	—	—	—	—
G40230	4023	0.20-0.25	0.70-0.90	0.030	0.040	0.15-0.35	—	—	0.20-0.30	—
G40270	4027	0.25-0.30	0.70-0.90	0.030	0.040	0.15-0.35	—	—	0.20-0.30	—
G40370	4037	0.35-0.40	0.70-0.90	0.030	0.040	0.15-0.35	—	—	0.20-0.30	—
G40470	4047	0.45-0.50	0.70-0.90	0.030	0.040	0.15-0.35	—	—	0.20-0.30	—
G41180	4118	0.18-0.23	0.70-0.90	0.030	0.040	0.15-0.35	—	0.40-0.60	0.08-0.15	—
G41200	4120 ²	0.18-0.23	0.90-1.20	0.030	0.040	0.15-0.35	—	0.40-0.60	0.13-0.20	—
G41300	4130	0.28-0.33	0.40-0.60	0.030	0.040	0.15-0.35	—	0.80-1.10	0.15-0.25	—
G41370	4137	0.35-0.40	0.70-0.90	0.030	0.040	0.15-0.35	—	0.80-1.10	0.15-0.25	—
G41400	4140	0.38-0.43	0.75-1.00	0.030	0.040	0.15-0.35	—	0.80-1.10	0.15-0.25	—
G41420	4142	0.40-0.45	0.75-1.00	0.030	0.040	0.15-0.35	—	0.80-1.10	0.15-0.25	—
G41450	4145	0.43-0.48	0.75-1.00	0.030	0.040	0.15-0.35	—	0.80-1.10	0.15-0.25	—
G41500	4150	0.48-0.53	0.75-1.00	0.030	0.040	0.15-0.35	—	0.80-1.10	0.15-0.25	—
G43200	4320	0.17-0.22	0.45-0.65	0.030	0.040	0.15-0.35	1.65-2.00	0.40-0.60	0.20-0.30	—
G43400	4340	0.38-0.43	0.60-0.80	0.030	0.040	0.15-0.35	1.65-2.00	0.70-0.90	0.20-0.30	—
G43406	E4340 ²	0.38-0.43	0.65-0.85	0.025	0.025	0.15-0.35	1.65-2.00	0.70-0.90	0.20-0.30	—
G46200	4620	0.17-0.22	0.45-0.65	0.030	0.040	0.15-0.35	1.65-2.00	—	0.20-0.30	—
G48200	4820	0.18-0.23	0.50-0.70	0.030	0.040	0.15-0.35	3.25-3.75	—	0.20-0.30	—
G50461	50846 ³	0.44-0.49	0.75-1.00	0.030	0.040	0.15-0.35	—	0.20-0.35	—	—
G51200	5120	0.17-0.22	0.70-0.90	0.030	0.040	0.15-0.35	—	0.70-0.90	—	—
G51300	5130	0.28-0.33	0.70-0.90	0.030	0.040	0.15-0.35	—	0.80-1.10	—	—
G51320	5132	0.30-0.35	0.60-0.80	0.030	0.040	0.15-0.35	—	0.75-1.00	—	—
G51400	5140	0.38-0.43	0.70-0.90	0.030	0.040	0.15-0.35	—	0.70-0.90	—	—
G51500	5150	0.48-0.53	0.70-0.90	0.030	0.040	0.15-0.35	—	0.70-0.90	—	—
G51600	5160	0.56-0.64	0.75-1.00	0.030	0.040	0.15-0.35	—	0.70-0.90	—	—
G51860 ³	51860 ³	0.56-0.64	0.75-1.00	0.030	0.040	0.15-0.35	—	0.70-0.90	—	—
G52986	E52100 ²	0.98-1.10	0.25-0.45	0.025	0.025	0.15-0.35	—	1.30-1.60	—	—
G61500	6150	0.48-0.53	0.70-0.90	0.030	0.040	0.15-0.35	—	0.80-1.10	—	0.15 min
G86150	8615	0.17-0.18	0.70-0.90	0.030	0.040	0.15-0.35	0.40-0.70	0.40-0.60	0.15-0.25	—
G86170	8617	0.15-0.20	0.70-0.90	0.030	0.040	0.15-0.35	0.40-0.70	0.40-0.60	0.15-0.25	—
G86200	8620	0.18-0.23	0.70-0.90	0.030	0.040	0.15-0.35	0.40-0.70	0.40-0.60	0.15-0.25	—
G86220	8622	0.20-0.25	0.70-0.90	0.030	0.040	0.15-0.35	0.40-0.70	0.40-0.60	0.15-0.25	—
G86300	8630	0.28-0.33	0.70-0.90	0.030	0.040	0.15-0.35	0.40-0.70	0.40-0.60	0.15-0.25	—
G86400	8640	0.38-0.43	0.75-1.00	0.030	0.040	0.15-0.35	0.40-0.70	0.40-0.60	0.15-0.25	—
G86450	8645	0.43-0.48	0.75-1.00	0.030	0.040	0.15-0.35	0.40-0.70	0.40-0.60	0.15-0.25	—
G87200	8720	0.18-0.23	0.70-0.90	0.030	0.040	0.15-0.35	0.40-0.70	0.40-0.60	0.20-0.30	—
G88220	8822	0.20-0.25	0.75-1.00	0.030	0.040	0.15-0.35	0.40-0.70	0.40-0.60	0.30-0.40	—
G92590	9259	0.56-0.64	0.75-1.00	0.030	0.040	0.70-1.10	—	0.45-0.65	—	—
G92600	9260	0.56-0.64	0.75-1.00	0.030	0.040	1.80-2.20	—	—	—	—

¹ For standard variations in composition limits, see Table 4 of SAE J409. Small quantities of certain elements which are not specified or required may be found in alloy steels. These elements are to be considered as incidental and are acceptable to the following maximum amount: copper to 0.35%, nickel to 0.25%, chromium to 0.20%, and molybdenum to 0.06%.

² Electro furnace steel.

³ Boron content is 0.0005 to 0.003%.

NOTE—Lead—Standard carbon steels can be produced with a range of 0.015 to 0.35% to improve machinability. Such steels are identified by inserting the letter "L" between the second and third numerals of the grade number, for example, 10L45. The UNS designation is also modified by changing the last digit to "4" to indicate lead, for example, G10454. Lead is generally reported as a range of 0.15-0.35%.

⁴Formerly EX15

NOTE—The analysis of the following elements shall be reported regardless of whether they are specified: Aluminum, Titanium, Columbium, Vanadium. If the analysis of any of these elements is less than 0.008%, it may be reported as <0.008%.

Figura 5.7 - Composição química dos aços liga (ou para construção mecânica), conforme SAE J404.

- Série 51XX:

Aços desta série apresentam o Cromo como elemento de liga principal, em teores desde 0,70 até 1,10%. Por exemplo, um aço SAE/AISI 5140 é um aço liga ao Cromo, contendo 0,38 a 0,43% C e 0,7 a 0,90% Cr em peso e um aço SAE/AISI 5120 é um aço liga ao Cromo, contendo 0,17 a 0,22% C e 0,7 a 0,90% Cr em peso.

- Série 41XX

Os aços desta série apresentam o Cromo e o Molibdênio como elementos de liga principais, em teores desde 0,40 até 0,80% do primeiro e 0,08 a 0,25% do segundo. Por exemplo, um aço SAE/AISI 4140 é um aço liga ao Cromo e Molibdênio, contendo 0,38 a 0,43% C, 0,80 à 1,10% Cr e 0,15 à 0,25% Mo em peso e um aço SAE/AISI 4120 é um aço liga ao Cromo e Molibdênio, contendo 0,18 à 0,23% C, 0,40 à 0,60% Cr e 0,13 à 0,20% Mo em peso.

- Série 86XX

Os aços desta série apresentam o Cromo, Níquel e o Molibdênio como elementos de liga principais, em teores desde 0,40 até 0,60% Cr, 0,15 a 0,25% Mo e 0,40 a 0,70% Ni. Por exemplo, um aço SAE/AISI 8640 é um aço liga ao Cromo e Molibdênio, contendo 0,38 a 0,43% C, 0,40 até 0,60% Cr, 0,15 a 0,25% Mo e 0,40 a 0,70% Ni em peso e um aço SAE/AISI 8620 é um aço liga ao Cromo, Níquel e Molibdênio, contendo 0,18 à 0,23% C, 0,40 até 0,60% Cr, 0,15 a 0,25% Mo e 0,40 a 0,70% Ni em peso.

- Série 43XX

Os aços desta série apresentam Cromo, Níquel e o Molibdênio como elementos de liga principais, em teores desde 0,40 até 0,90% Cr, 0,20 a 0,30% Mo e 1,65 a 2,00% Ni. Por exemplo, um aço SAE/AISI 4340 é um aço liga ao Cromo, Níquel e Molibdênio, contendo 0,38 a 0,43% C, 0,70 até 0,90% Cr, 0,20 a 0,30% Mo e 1,65 a 2,00% Ni em peso e um aço SAE/AISI 4320 é um aço liga ao Cromo, Níquel e Molibdênio, contendo 0,17 à 0,22% C, 0,40 até 0,60% Cr, 0,20 a 0,30% Mo e 1,65 a 2,00% Ni em peso.

- Série 93XX

Os aços desta série apresentam Níquel, o Cromo e o Molibdênio como elementos de liga principais, em teores nominais de 3,25% Ni, 1,20% Cr e 0,12% Mo.

Pode-se notar que as séries ordenadas nesta seqüência apresentam teores de elementos de liga crescentes, apresentando um diferencial cada vez maior à medida que estes teores são elevados. A tabela 5.1 apresenta um resumo geral dos aços liga.

Tabela 5.1 - Resumo das especificações dos aços liga, em função dos elementos de liga principais.

Numerals and digits	Type of steel and nominal alloy content, %	Numerals and digits	Type of steel and nominal alloy content, %	Numerals and digits	Type of steel and nominal alloy content, %		
Carbon steels							
10xx(a).....	Plain carbon (Mn 1.00 max)	43xx.....	Ni 1.82; Cr 0.50 and 0.80; Mo 0.25	50xxx.....	Cr 0.50		
11xx.....	Resulturized	43BVxx.....	Ni 1.82; Cr 0.50; Mo 0.12 and 0.25; V 0.03 min	51xxx.....	Cr 1.02		
12xx.....	Resulturized and rephosphorized	47xx.....	Ni 1.05; Cr 0.45; Mo 0.20 and 0.35	52xxx.....	Cr 1.45		
15xx.....	Plain carbon (max Mn range: 1.00–1.65)	81xx.....	Ni 0.30; Cr 0.40; Mo 0.12	Cromium (bearing) steels			
13xx.....	Mn 1.75	86xx.....	Ni 0.55; Cr 0.50; Mo 0.20	50xxx.....	Cr 0.50		
Manganese steels							
13xx.....	Mn 1.75	87xx.....	Ni 0.55; Cr 0.50; Mo 0.25	51xxx.....	Cr 1.02		
Nickel steels							
23xx.....	Ni 3.50	88xx.....	Ni 0.55; Cr 0.50; Mo 0.35	52xxx.....	Cr 1.45		
25xx.....	Ni 5.00	93xx.....	Ni 3.25; Cr 1.20; Mo 0.12	Chromium-vanadium steels			
Nickel-chromium steels							
31xx.....	Ni 1.25; Cr 0.65 and 0.80	94xx.....	Ni 0.45; Cr 0.40; Mo 0.12	61xx.....	Cr 0.60, 0.80, and 0.95; V 0.10 and 0.15 min		
32xx.....	Ni 1.75; Cr 1.07	97xx.....	Ni 0.55; Cr 0.20; Mo 0.20	72xx.....	W 1.75; Cr 0.75		
33xx.....	Ni 3.50; Cr 1.50 and 1.57	98xx.....	Ni 1.00; Cr 0.80; Mo 0.25	Silicon-manganese steels			
34xx.....	Ni 3.00; Cr 0.77	Nickel-molybdenum steels					
Molybdenum steels							
40xx.....	Mo 0.20 and 0.25	46xx.....	Ni 0.85 and 1.82; Mo 0.20 and 0.25	9xx.....	Various SAE grades		
44xx.....	Mo 0.40 and 0.52	48xx.....	Ni 3.50; Mo 0.25	Boron steels			
Chromium-molybdenum steels		Chromium steels					
41xx.....	Cr 0.50, 0.80, and 0.95; Mo 0.12, 0.20, 0.25, and 0.30	50xx.....	Cr 0.27, 0.40, 0.50, and 0.65	xxBxx.....	B denotes boron steel		
		51xx.....	Cr 0.80, 0.87, 0.92, 0.95, 1.00, and 1.05	Leaded steels			

(a) The xx in the last two digits of these designations indicates that the carbon content (in hundredths of a percent) is to be inserted.

5.3- Aços Inoxidáveis:

Os aços Inoxidáveis são designados, genericamente, a partir de quatro séries com nomes oriundos da microestrutura principal presente no aço. Conceitualmente, os aços são designados de Inoxidáveis quando apresentarem teor de Cromo superior a 11,5%. O Cromo presente promove a formação de uma película de óxidos de Cromo estável na superfície do aço, promovendo o retardamento do avanço da corrosão, pelo efeito de barreira física entre o Oxigênio do ambiente o Ferro do aço.

De forma geral, existem as seguintes séries de aços Inoxidáveis:

- Série 300 (Aços Inoxidáveis Austeníticos)

- Série 400 (Aços Inoxidáveis Ferríticos)
- Série 400 (Aços Inoxidáveis Martensíticos)
- Série de Aços Endurecíveis por Precipitação

A série 300, denominada Aços Inoxidáveis Austeníticos, apresenta estrutura austenítica em temperatura ambiente, uma vez que os elementos de liga, especialmente o Níquel, promovem a estabilização da austenita. A série 300 apresenta teor de Carbono baixo, especialmente pela propriedade principal desta classe de aços que é a disponibilização do Cromo para a formação de uma película óxidos que promovem a redução da corrosão. Quando o teor de Carbono é elevado, a formação de carbonetos de Cromo pode levar à redução do desempenho quanto à corrosão além de causar, muitas vezes, outros fenômenos que degradam o material, como a conhecida “Sensitização”. O teor de Níquel está na faixa de 3,5 a 37%, enquanto o teor de Cromo está na faixa de 15 a 26%. O Manganês normalmente é de 2,00% e os teores de Fósforo e Enxofre encontram-se desde 0,04 a 0,20 e 0,03 a 0,15 respectivamente. Esta série pode apresentar ainda outros elementos como Molibdênio, Cobre, titânio, Nióbio, tântalo e Nitrogênio.

Esta série de aços inoxidáveis é especialmente utilizada em aplicações onde a resistência à corrosão e a conformabilidade sejam requisitos importantes de projeto.

A série 400 engloba os Aços Inoxidáveis Ferríticos e Martensíticos. A série 400 Ferrítica apresenta microestrutura de Ferro alfa. O elemento de liga principal da série ferrítica é o Cromo com teor na faixa de 11,5 a 27%. O Manganês normalmente é de 1,00% e os teores de Fósforo e Enxofre encontram-se torno 0,04 e 0,03 respectivamente. Esta série pode apresentar ainda outros elementos como Molibdênio, titânio, Nióbio, selênio e Nitrogênio. O Carbono é mantido baixo pelos mesmos motivos apresentados anteriormente, ou seja, a formação de carbonetos de Cromo pode levar à redução do desempenho quanto à corrosão.

A segunda subsérie dentro da 400 (terceira série apresentada) é a dos aços Inoxidáveis Martensíticos, a qual recebe esta nomenclatura devido à microestrutura presente ser a resultante do processo de têmpera e revenimento, ou seja, a martensita. O elemento de liga principal da série é o Cromo com teor na faixa de 11,5 a 18,00%. O Manganês normalmente é de 1,00% e os teores de Fósforo e Enxofre encontram-se torno 0,04 e 0,03 respectivamente. Esta série pode apresentar ainda outros elementos como Molibdênio,

Vanádio e Tungstênio. O Carbono nesta série pode ser limitado a 0,15 devido à necessidade de transformação martensítica para as aplicações que requerem maior resistência à corrosão e pode chegar a 1,20 nas aplicações em que a resistência ao desgaste é requisito importante.

A última série é a dos aços Inoxidáveis Endurecíveis por Precipitação, a qual recebe esta nomenclatura devido ao mecanismo de endurecimento que envolve o processo de solubilização e envelhecimento ou endurecimento por precipitação. Também são conhecidos como aços PH, do inglês “Precipitation Hardening”. Os elementos de liga principais da série são o Cromo com teor na faixa de 12,25 a 18,00%, o Manganês normalmente é de 1,00% (ou menor) e os teores de Fósforo e Enxofre encontram-se, normalmente, em torno 0,04 e 0,03 respectivamente. Esta série apresenta ainda Níquel entre 3,00 e 8,50% além de outros elementos como Molibdênio, Cobre, Alumínio, Nióbio e Nitrogênio. O Carbono nesta série pode ser limitado a 0,09 devido à necessidade de resistência à corrosão.

A figura 5.8 (a), (b), (c) e (d) apresentam a classificação dos aços Inoxidáveis, conforme SAE J405. Em seguida, a figura 5.9 apresenta uma tabela resumo dos principais aços inoxidáveis, conforme Metals Handbook.

TABLE 1—CHEMICAL COMPOSITION REQUIREMENTS, %⁽¹⁾

UNS Designation ⁽²⁾	Type ⁽³⁾	Carbon ⁽⁴⁾	Manganese	Phos- phorus	Sulfur	Silicon	Chromium	Nickel	Molybdenum	Nitrogen	Copper	Other Elements ⁽⁶⁾
Austenitic (Chromium-Nickel) (Chromium-Nickel-Nitrogen-Nickel)												
N08367	—	0.030	2.00	0.040	0.030	1.00	20.00-22.00	23.50-25.50	6.00-7.00	0.18-0.25	0.75	—
N08800	—	0.10	1.50	0.045	0.015	1.00	19.0-23.0	30.0-35.0	—	—	0.75	Al 0.15-0.60 Ti 0.15-0.60
N08810	—	0.05-0.10	1.50	0.045	0.015	1.00	19.0-23.0	30.0-35.0	—	—	0.75	Al 0.15-0.60 Ti 0.15-0.60
N08904	904L ⁽⁶⁾	0.020	2.00	0.045	0.035	1.00	19.00-23.00	23.00-28.00	4.0-5.0	0.10	10-2.0	—
N08926	—	0.020	2.00	0.030	0.010	0.50	19.00-21.00	24.00-26.00	6.0-7.0	0.15-0.25	0.5-1.5	—
S20100	201	0.15	6.50-7.50	0.060	0.030	1.00	16.00-18.00	3.50-5.50	—	0.25	—	—
S20103	—	0.03	6.50-7.50	0.045	0.030	0.75	16.00-18.00	3.50-5.50	—	0.25	—	—
S20153	—	0.03	6.40-7.50	0.045	0.015	0.75	16.00-17.50	4.00-5.00	—	0.10-0.25	1.00	—
S20161	—	0.15	4.00-5.00	0.040	0.040	3.00-4.00	15.00-16.00	4.00-6.00	—	0.08-0.20	—	—
S20200	202	0.15	7.50-10.0	0.060	0.030	1.00	17.00-19.00	4.00-6.00	—	0.25	—	—
S20400	—	0.030	7.00-9.00	0.040	0.030	1.00	15.00-17.00	1.50-3.00	—	0.15-0.30	—	—
S20810	XM-18 ⁽⁷⁾	0.06	4.00-6.00	0.040	0.030	0.75	20.50-23.50	11.50-13.50	1.50-3.00	0.20-0.40	—	Cb 0.10-0.30 V 0.10-0.30
S21400	XM-31 ⁽⁷⁾	0.12	14.00-16.00	0.045	0.030	0.30-1.00	17.00-18.50	1.00	—	0.35 min	—	—
S21600	XM-17 ⁽⁷⁾	0.08	7.50-9.00	0.045	0.030	0.75	17.50-22.00	5.00-7.00	2.00-3.00	0.25-0.50	—	—
S21603	XM-18 ⁽⁷⁾	0.03	7.50-8.00	0.045	0.030	0.75	17.50-22.00	5.00-7.00	2.00-3.00	0.25-0.50	—	—
S21800	—	0.10	7.00-9.00	0.060	0.030	3.50-4.50	16.00-18.00	8.00-9.00	—	0.08-0.18	—	—
S24000	XM-25 ⁽⁷⁾	0.08	11.50-14.50	0.060	0.030	0.75	17.00-19.00	2.25-3.75	—	0.20-0.40	—	—
S30100	301	0.15	2.00	0.045	0.030	1.00	16.00-18.00	6.00-8.00	—	0.10	—	—
S30200	302	0.15	2.00	0.045	0.030	0.75	17.00-19.00	6.00-10.00	—	0.10	—	—
S30400	304	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	18.00-20.00	8.00-10.50	—	0.10	—	—
S30403	304L	0.030	2.00	0.045	0.030	0.75	18.00-20.00	8.00-12.00	—	0.10	—	—
S30469	304L ¹¹	0.04-0.10	2.00	0.045	0.030	0.75	18.00-20.00	8.00-10.50	—	—	—	—
S30415	—	0.04-0.06	0.80	0.045	0.030	1.00-2.00	18.00-19.00	9.00-10.00	—	0.12-0.18	—	—
S30451	304LN	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	18.00-20.00	8.00-10.50	—	0.10-0.16	—	—
S30452	XM-21	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	18.00-20.00	8.00-10.50	—	0.10-0.30	—	—
S30453	304LN	0.030	2.00	0.045	0.030	0.75	18.00-20.00	8.00-12.00	—	0.10-0.16	—	—
S30500	305	0.12	2.00	0.045	0.030	0.75	17.00-19.00	10.50-13.00	—	—	—	—
S30600	—	0.018	2.00	0.20	0.020	3.7-4.3	17.0-18.5	14.0-15.5	0.20	—	0.50	—
S30601	—	0.015	0.50-0.80	0.030	0.013	5.00-5.60	17.00-18.00	0.20	0.050	0.36	—	—
S30615	—	0.16-0.24	2.00	0.030	0.030	3.2-4.0	17.0-19.5	13.5-18.0	—	—	Al 0.6-1.5	—
S30815	—	0.05-0.10	0.80	0.040	0.030	1.40-2.00	20.00-22.00	10.00-12.00	—	0.14-0.20	—	Ge 0.03-0.08
S30908	309S	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	22.00-24.00	12.00-15.00	—	—	—	—
S30909	309H ⁽⁶⁾	0.04-0.10	2.00	0.045	0.030	0.75	22.00-24.00	12.00-16.00	—	—	—	Cb 10 x C min. 1.10 max
S30940	309CB ⁽⁶⁾	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	22.00-24.00	12.00-16.00	—	—	—	—

Figura 5.8 (a) – Composição química dos aços inoxidáveis.

SAE J405 Revised JUN1998

TABLE 1—CHEMICAL COMPOSITION REQUIREMENTS, %⁽¹⁾ (CONTINUED)

UNS Designation ⁽⁴⁾	Type ⁽³⁾	Carbon ⁽⁴⁾	Manganese ⁽⁴⁾	Phosphorus	Sulfur	Silicon	Chromium	Nickel	Molybdenum	Nitrogen	Copper	Other Elements ⁽⁵⁾
S30941	309HCb ⁽⁶⁾	0.04-0.10	2.00	0.045	0.030	0.75	22.00-24.00	12.00-16.00	—	—	—	Cb 10 x C min, 1.10 max
S31008	310S	0.08	2.00	0.045	0.030	1.50	24.00-26.00	19.00-22.00	—	—	—	—
S31009	310L ⁽⁶⁾	0.04-0.10	2.00	0.045	0.030	0.75	24.00-26.00	19.00-22.00	—	—	—	—
S31040	310Cb ⁽⁶⁾	0.08	2.00	0.045	0.030	1.50	24.00-26.00	19.00-22.00	—	—	—	Cb 10 x C min, 1.10 max
S31041	310HCb ⁽⁶⁾	0.04-0.10	2.00	0.045	0.030	0.75	24.00-26.00	19.00-22.00	—	—	—	Cb 10 x C min, 1.10 max
S31050	310 MoLN ⁽⁶⁾	0.030	2.00	0.030	0.010	0.50	24.00-26.00	21.00-23.00	2.00-3.00	0.10-0.16	—	—
S31254	—	0.020	1.00	0.030	0.010	0.80	19.50-20.50	17.50-18.50	6.00-6.50	0.19-0.22	0.50-1.00	—
S31266	—	0.030	2.00-4.00	0.035	0.020	1.00	23.00-25.00	21.00-24.00	5.00-7.00	0.35-0.60	0.50-3.00	W 1.05-3.00
S31600	316	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	16.00-18.00	10.00-14.00	2.00-3.00	0.10	—	—
S31603	316L	0.030	2.00	0.045	0.030	0.75	18.00-19.00	10.00-14.00	2.00-3.00	0.10	—	—
S31609	316H	0.04-0.10	2.00	0.045	0.030	0.75	16.00-18.00	10.00-14.00	2.00-3.00	—	—	—
S31635	316L ⁽⁶⁾	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	16.00-18.00	10.00-14.00	2.00-3.0	0.10	—	Ti 5 x (C + N) min, 0.70 max
S31640	316Cb ⁽⁶⁾	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	16.00-18.00	10.00-14.00	2.00-3.0	0.10	—	Cb 10 x C min, 1.10 max
S31651	316N	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	16.00-18.00	10.00-14.00	2.00-3.00	0.10	—	—
S31653	316LN	0.030	2.00	0.045	0.030	0.75	16.00-18.00	10.00-14.00	2.00-3.00	0.10-0.16	—	—
S31700	317	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	16.00-20.00	11.00-15.00	3.00-4.00	0.10	—	—
S31703	317L	0.030	2.00	0.045	0.030	0.75	16.00-20.00	11.00-15.00	3.00-4.00	0.10	—	—
S31725	—	0.030	2.00	0.045	0.030	0.75	16.00-20.00	13.50-17.50	4.0-5.0	0.20	—	—
S31726	—	0.030	2.00	0.045	0.030	0.75	17.00-20.00	13.50-17.50	4.0-5.0	0.10-0.20	—	—
S31753	317LN ⁽⁶⁾	0.030	2.00	0.045	0.030	0.75	16.00-20.00	11.00-15.00	3.00-4.00	0.10-0.22	—	—
S32100	321	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	17.00-19.00	9.00-12.00	—	0.10	—	Ti 5 x (C + N) min, 0.70 max
S32109	321H	0.04-0.10	2.00	0.045	0.030	0.75	17.00-19.00	9.00-12.00	—	—	—	Ti 4 x (C + N) min, 0.70 max
S32615	—	0.07	2.00	0.045	0.030	4.8-6.0	16.5-19.5	19.0-22.0	0.30-1.5	—	1.5-2.5	—
S32654	—	0.020	2.00-4.00	0.030	0.005	0.50	24.00-26.00	21.00-23.00	7.00-8.00	0.45-0.55	* 0.30-0.60	—
S33228	—	0.04-0.08	1.00	0.020	0.015	0.030	26.0-28.0	31.0-33.0	—	—	—	Co 0.05-0.10 Ch 0.6-1.0 Al 0.025
S34565	—	0.030	5.00-7.00	0.030	0.010	1.00	23.00-25.00	16.00-18.00	4.00-5.00	0.40-0.60	—	Cb 0.10
S34700	347	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	17.00-19.00	9.00-13.00	—	—	—	Cb 10 x C min, 1.00 max
S34709	347H	0.04-0.10	2.00	0.045	0.030	0.75	17.00-19.00	9.00-13.00	—	—	—	Cb 8 x C min, 1.00 max
S34800	348	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	17.00-19.00	9.00-13.00	—	—	—	Cb 10 x C min, 1.00 max
S34809	348H	0.04-0.10	2.00	0.045	0.030	0.75	17.00-19.00	9.00-13.00	—	—	—	Co 0.10 max
											—	Co 0.20
											—	Cb 10 x C min, 1.00 max
											—	Co 0.20

Figura 5.8 (b) – Composição química dos aços inoxidáveis.

SAE J405 Revised JUN1998

TABLE 1—CHEMICAL COMPOSITION REQUIREMENTS, %⁽¹⁾ (CONTINUED)

UNS Designation ⁽²⁾	Type ⁽³⁾	Carbon ⁽⁴⁾	Manganese ⁽⁴⁾	Phosphorus	Sulfur	Silicon	Chromium	Nickel	Molybdenum	Nitrogen	Copper	Other Elements ⁽⁵⁾
S35315	—	0.04-0.08	2.00	0.040	0.030	1.20-2.00	24.00-28.00	34.00-38.00	—	0.12-0.18	—	Ce 0.03-0.08
S36100	XM-15 ⁽⁷⁾	0.08	2.00	0.030	0.030	1.50-2.50	17.50-19.00	17.50-18.50	—	—	—	—
S31200	—	0.030	2.00	0.045	0.030	1.00	24.0-28.0	5.5-6.5	1.2-2.0	0.14-0.20	—	—
S31260	—	0.03	1.00	0.030	0.030	0.75	24.0-26.0	5.5-7.50	2.50-3.50	0.10-0.30	0.20-0.80	W 0.10-0.50
S31803	—	0.030	2.00	0.030	0.020	1.00	21.0-23.0	4.50-6.50	2.50-3.50	0.08-0.20	—	—
S32205	—	0.030	2.00	0.020	0.020	1.00	22.0-23.0	4.50-6.50	3.00-3.50	0.14-0.20	—	—
S32304	—	0.030	2.50	0.040	0.030	1.00	21.5-24.5	3.00-5.00	0.05-0.80	0.05-0.20	0.05-0.30	—
S32520	—	0.030	1.50	0.035	0.020	0.80	24.00-26.00	5.50-8.00	3.00-6.00	0.20-0.35	0.50-3.00	—
S32550	—	0.04	1.5	0.040	0.030	1.0	24.0-27.0	4.5-6.5	2.9-3.9	0.10-0.25	1.5-2.5	—
S32750	—	0.030	1.20	0.035	0.020	0.80	24.0-26.0	6.00-8.00	3.00-5.00	0.24-0.32	0.50	—
S32760	—	0.030	1.00	0.030	0.010	1.00	24.00-28.00	6.00-8.00	3.00-4.00	0.20-0.30	0.50-1.00	W 0.50-1.00 Cr + 3.1% 16 N = 40 min
S32900	329	0.08	1.00	0.040	0.030	0.75	23.00-28.00	2.50-5.00	1.0-2.0	—	—	—
S32850	—	0.03	2.00	0.035	0.010	0.60	26.00-28.00	3.50-5.20	1.00-2.50	0.15-0.35	—	—
S32903	—	0.015	0.50	0.020	0.0035	0.55	28.00-29.00	3.0-4.0	1.8-2.5	0.020 (C+N) 0.030 max	—	Cb 0.15-0.50 12 (C+N) min
S40500	405	0.08	1.00	0.040	0.030	1.00	11.50-14.50	0.60	—	—	—	Al 0.10-0.30
S40900	409	0.08	1.00	0.045	0.030	1.00	10.50-11.75	0.50	—	—	—	Ti 6 x C min; 0.75 max
S40945	—	0.030	1.00	0.040	0.030	1.00	10.50-11.75	0.50	—	0.030	—	Cr 0.18-0.40 Ti 0.05-0.20
S40975	—	0.030	1.00	0.040	0.030	1.00	10.50-11.75	0.50-1.00	—	0.030	—	Ti 6 (C+N) min and 0.75 max
S41000	410	0.15	1.00	0.040	0.030	1.00	11.50-13.50	0.75	—	—	—	—
S41003	—	0.03	1.50	0.040	0.030	1.00	10.50-12.50	1.50	—	—	—	N 0.030 max
S41008	410S	0.08	1.00	0.040	0.030	1.00	11.50-13.50	0.80	—	—	—	—
S41045	—	0.030	1.00	0.040	0.030	1.00	12.00-13.00	0.50	—	0.030	—	Cb 9 (C+N) min, 0.60 max
S41050	—	0.040	1.00	0.045	0.030	1.00	10.50-12.50	0.60-1.10	0.10	—	—	—
S41500 ⁽⁵⁾	—	0.05	0.5-1.0	0.030	0.030	0.60	11.5-14.0	3.5-5.5	0.5-1.0	—	—	—
S42000	42B ⁽⁶⁾	0.12	1.00	0.040	0.030	1.00	14.00-16.00	—	—	—	—	—
S43000	430	0.12	1.00	0.040	0.030	1.00	16.00-18.00	0.75	—	—	—	—
S43035	439	0.07	1.00	0.040	0.030	1.00	17.00-19.00	0.50	—	0.04	—	Ti 0.20-4 (C+N) min, 1.10 max Al 0.15 max
S43400	—	0.12	1.00	0.040	0.030	1.00	18.00-18.00	—	0.75-1.25	—	—	—
S43600	—	0.12	1.00	0.040	0.030	1.00	16.00-18.00	—	0.75-1.25	—	—	Cb 5 x C min; 0.80 max
S43922	—	0.030	1.00	0.040	0.030	1.00	17.0-19.0	0.50	—	0.030	—	Ti - Cr 0.20-4 (C+N) min, 0.75 max Al 0.15 max

Figura 5.8 (c) – Composição química dos aços inoxidáveis.

TABLE 1—CHEMICAL COMPOSITION REQUIREMENTS, %⁽¹⁾ (CONTINUED)

UHS Designation ⁽²⁾	Type ⁽³⁾	Carbon ⁽⁴⁾	Manganese	Phos- phorus	Sulfur	Silicon	Chromium	Nickel	Molybdenum	Nitrogen	Copper	Other Elements ⁽⁵⁾
S44400	444	0.026	1.00	0.040	0.030	1.00	17.5-19.5	1.00	1.75-2.50	0.035	—	Ti + Cr 0.20-4 (C + N) min; 0.80 max
S44500	—	0.020	1.00	0.040	0.012	1.00	19.00-21.00	0.60	—	0.03	0.30	0.60
S44626	XM-33 ⁽⁷⁾	0.06	0.75	0.040	0.020	0.75	25.00-27.00	0.50	0.75-1.50	0.04	0.20	Ti 0.20-1.00 7 (C + N) min
S44627	SM21 ⁽⁷⁾	0.010 ⁽⁶⁾	0.40	0.020	0.020	0.40	25.00-27.50	0.50	0.75-1.50	0.015 ⁽⁵⁾	0.20	Cb 0.05-0.20 Ni + Cu 0.50 max
S44635	—	0.026	1.00	0.040	0.030	0.75	24.5-26.0	3.5-4.5	3.5-4.5	0.035	—	Ti + Cr 0.20-4 (C + N) min; 0.80 max
S44660	—	0.030	1.00	0.040	0.030	1.00	25.0-28.0	1.0-3.50	3.00-4.00	0.040	—	Ti + Cr 0.20-4 -1.00 and 6 (C + N) min
S44700	—	0.010	0.30	0.025	0.020	0.20	28.0-30.0	0.15	3.5-4.2	0.020	0.15	(C + N) 0.025 max
S44735	—	0.030	1.00	0.040	0.030	1.00	28.00-30.00	1.00	3.60-4.20	0.045	—	Ti + Cr = 0.20-1.00 and 6 (C + N) min
S44800	—	0.010	0.30	0.025	0.020	0.20	28.0-30.0	2.0-2.5	3.5-4.2	0.020	0.15	(C + N) 0.025 max
S46800	—	0.030	1.00	0.040	0.030	1.00	18.00-20.00	0.50	—	—	—	Ti 0.07-0.30 Cb 0.10-0.60 N 0.030 max Ti + Cr = 0.20 + 4 (C + N) min; 0.80 max

1. Maximum, unless range or minimum is indicated.
2. Designation established in accordance with Practices F-527 and SAE J1086.
3. Unless otherwise indicated, a grade designation originally assigned by the American Iron and Steel Institute (AISI).
4. Carbon analysis shall be reported to nearest 0.01% except for the low-carbon types, which shall be reported to nearest 0.001%.
5. The terms Columbium (Cb) and Niobium (Nb) both relate to the same element.
6. Common name, not a trademark, widely used, not associated with any one producer.
7. Naming system developed and applied by ASTM.

Figura 5.8 (d) – Composição química dos aços inoxidáveis.

5.4- Aços Ferramenta (alta liga)

Introdução:

Genericamente referidos aos aços para ferramenta e matrizes, ou simplesmente aços Ferramenta, designamos os materiais Ferrosos utilizados na confecção do ferramental de que se serve a indústria, para a fabricação manual ou em máquinas ferramentas, de toda a variedade de utilidades. A cada família de aços ferramenta, é adotada uma letra maiúscula designativa e a diferenciação entre os aços da mesma família é realizada pela adoção de números escritos logo após a letra que representa a família.

Deve-se observar que, em uma mesma família, não encontramos todos os números da série de algarismos. Em uma determinada série, por exemplo, a O, podemos encontrar a classificação O1, O2, O6 e O7, que significa que as séries (composições) com numeração faltante caíram em desuso e foram suprimidas da classificação, não mais figurando nas publicações das instituições normativas (SAE, ASTM, outras).

Serão apresentadas a seguir as principais características das famílias de aços ferramenta, segundo SAE / AISI.

Série W (Aços de têmpera em água):

A sua nomenclatura provém da palavra “Water”, em inglês, pois são aços de têmpera em água ou salmoura. O teor de Carbono desta série pode ser especialmente especificado (pelo comprador) na faixa desde 0,60 até 1,40%. O teor de elementos de liga desta série ou é nula ou limita-se a pequenos teores de Cromo e Vanádio, sendo o primeiro limitado a 0,50% (eleva a temperabilidade) e o segundo a 0,25% (confere granulação refinada ao aço = tenacidade). São aços conhecidos como aços ferramenta ao Carbono.

A SAE recomenda uma divisão em quatro grupos:

- a) Aços W de qualidade 1, apresenta qualidade especial quanto à composição química com controle rígido dos teores de elementos de liga e temperabilidade.
- b) Aços W de qualidade 2, apresenta qualidade especial, entretanto sem controle rígido de composição química, mas com controle acurado de temperabilidade.
- c) Aços W de qualidade 3, apresenta qualidade “standard” ou padrão, entretanto sem certificado de controle da temperabilidade.

d) Aços W de qualidade 4, apresenta qualidade comercial, entretanto não são submetidos a testes especiais de qualidade nem garantia da profundidade de têmpera.

A figura 5.9 apresenta a composição química dos aços ferramenta ao Carbono tipo W, conforme ASTM A 686.

ASTM A 686

TABLE 1 Chemical Composition, % ^a

UNS Designation	Type	Grade	Carbon		Manganese		Silicon		Phosphorus, max	Sulfur, max	Chromium		Vanadium		Tungsten, max	Molybdenum, max	Copper, max	Nickel, max
			min	max	min	max	min	max			min	max	min	max				
T72301	W1	A	s	s	0.10	0.40	0.10	0.40	0.030	0.030	...	0.15	...	0.10	0.15	0.10	0.20	0.20
T72301	W1	C	s	s	0.10	0.40	0.10	0.40	0.030	0.030	...	0.30	...	0.10	0.15	0.10	0.20	0.20
T72302	W2	A	c	c	0.10	0.40	0.10	0.40	0.030	0.030	...	0.15	0.15	0.35	0.15	0.10	0.20	0.20
T72302	W2	C	c	c	0.10	0.40	0.10	0.40	0.030	0.030	...	0.30	0.15	0.35	0.15	0.10	0.20	0.20
T72305	W5	...	1.05	1.15	0.10	0.40	0.10	0.40	0.030	0.030	0.40	0.80	...	0.10	0.15	0.10	0.20	0.20

^a Chemistry limits include product analysis tolerances.

^b The carbon ranges for W1 and their respective suffix identification, sometimes referred to as tempers, are as follows:

Suffix	Carbon Range, %	Suffix	Carbon Range, %
8	0.80–0.90	10	1.00–1.10
8½	0.85–0.95	10½	1.05–1.15
9	0.90–1.00	11	1.10–1.20
9½	0.95–1.05	11½	1.15–1.25

^c The carbon ranges for W2 and their respective suffix identification are as follows:

Suffix	Carbon Range, %
8½	0.85–0.95
9	0.90–1.00
9½	0.95–1.10
13	1.30–1.50

Figura 5.9 – Composição química dos aços ferramenta ao Carbono, tipo W, conforme ASTM A 686.

Série S (Aços Resistentes ao Choque):

É uma série inicialmente desenvolvida para aplicação em molas e, por esta razão, tem alta resistência à fadiga e a choques mecânicos provenientes de esforços súbitos. A tenacidade é garantida pelo teor de Carbono que é mantido em máximo de 0,65% o que, por outro lado, reduz a dureza de têmpera. Para compensar este teor de Carbono, são adicionados, normalmente, elementos formadores de carbonetos, como o Cromo (0,50 – 3,5%), Molibdênio (0,20 – 1,80%) e Tungstênio (1,5 – 3,0%), podendo conter Vanádio e/ou Níquel. A temperabilidade dos aços da série S é maior do que a encontrada na série W. Atenção especial em tratamento térmico deve ser adotada para que não ocorra a descarbonetação, sob pena de comprometer a resistência à fadiga.

Série O (Aços para Trabalho a Frio de Têmpera em óleo):

Os aços para trabalho à frio distribuem-se em três grupos distintos, dependendo do aço selecionado para a fabricação. São eles, os aços de têmpera em óleo (série O), os aços de médio teor de elementos de liga (série A) e os aços de alto teor de liga e alto Carbono (série D). Uma das características destes aços é a necessidade de baixas taxas de resfriamento requeridas para a têmpera, que induzem menores distorções após tratamento térmico, sendo também referidos como “indeformáveis”.

Os aços da série O apresentam maior temperabilidade que os da série W, devido ao maior teor de elementos de liga e deles se aproximam quanto à resistência ao desgaste pelo teor elevado de Carbono. A têmpera em óleo resulta em menor risco de trincamento e modificações dimensionais, importante para ferramentas.

A série O contém, em geral, entre 0,85 e 1,55% Carbono, Cromo até 0,85%, Níquel até 0,30%, podendo conter Tungstênio, Molibdênio e Vanádio. São utilizados em matrizes para conformação à frio de metais, matrizes de corte, calibres, entre outros.

Série A (Aços para Trabalho a Frio de Têmpera ao Ar):

Esta série caracteriza-se pelos mais altos teores de Cromo (0,90 – 5,50%), Manganês (0,40 – 2,10%), Molibdênio (0,70 – 1,20) e, em alguns casos, Vanádio entre 0,15 e 5,15%. Ainda podem apresentar Tungstênio e Níquel. O teor de Carbono varia entre 0,45 e 2,00%, que eleva o teor de carbonetos, conferindo resistência à abrasão. Comparativamente aos aços da série D, são aços que apresentam o mesmo índice de deformação na têmpera, maior resistência a choques e menores temperaturas de tratamento térmico.

Série D (Aços para Trabalho a Frio com alto Cromo e alto Carbono):

Os aços desta série D são conhecidos pela capacidade de têmpera, sendo o D originado na palavra “Deep”, do inglês, profundidade de têmpera. São temperados ao ar ou ar soprado, apresentando baixa distorção dimensional, sendo frequentemente chamados de “indeformáveis”.

São aços que apresentam excepcional resistência ao desgaste, conferido pela elevada fração de carbonetos de Cromo presentes na sua microestrutura. Os aços desta série

apresentam baixa resistência a choques, com aplicação limitada desta série para as ferramentas sujeitas a este tipo de esforço.

O teor de Carbono desta série está entre 1,40 e 2,50%, o teor de Cromo entre 11,00 e 13,50%, o que confere a fração volumétrica de carbonetos mencionada. Podem conter ainda teores de Molibdênio, Vanádio, Tungstênio e Cobalto.

Série H (Aços para Trabalho a Quente):

Os aços para trabalho a quente destinam-se ao uso em ferramental que trabalhe em contato com material aquecido a temperaturas que podem chegar a 1100°C, o que corresponde a aquecimento do ferramental entre 550 e 600°C. Para que resistam a tais condições de trabalho e ainda mantenham a elevada dureza e resistência ao desgaste, eles apresentam na composição, teores de elementos como Cromo, Tungstênio, Molibdênio e Vanádio.

Apresentam alta temperabilidade, pelo seu elevado teor de elementos de liga e Carbono, que permitem resfriamento em ar soprado. A resistência a choques térmicos e mecânicos é imprescindível ao seu comportamento. Devem resistir ainda a carregamento cíclicos mecânicos e térmicos, ou seja, devem apresentar resistência à fadiga e fadiga térmica. Estas propriedades são conferidas pelo teor relativamente baixo de Carbono, na faixa de 0,22 a 0,55%.

A série H pode ser ao Cromo, em que apresenta cerca de 5% de Cromo médio na composição, podendo conter ainda elementos como Tungstênio, Molibdênio e Vanádio. O teor de Carbono está na faixa de 0,30 a 0,45%. Exemplos desta série são os aços H11, H12 e H13. Estes aços foram inicialmente desenvolvidos para matrizes de injeção de Alumínio. Algumas das suas propriedades principais são a alta temperabilidade (endurecimento ao ar), baixa distorção na têmpera, mínima oxidação em trabalho em temperatura e resistência ao desgaste pela reatividade com o Alumínio, além do relativo baixo custo (baixos teores de elementos de liga).

A série H pode ser ao Tungstênio, em que apresenta de 8,5 a 19,00% de Tungstênio na composição, além de Cromo entre 1,75 e 12,75% podendo ainda conter Vanádio. O teor de Carbono está na faixa de 0,22 a 0,55%. Exemplos desta série são os aços H21, H24 e H25. O elevado teor de Tungstênio confere elevada resistência a quente (dureza a quente ou

resistência ao revenimento) o que, por outro lado, reduz a resistência a choques térmicos, sendo limitado o uso de refrigeração dos moldes com água.

A série H apresenta ainda uma subsérie ao Molibdênio, contendo teores de Molibdênio na faixa de 4,50 a 5,50%, Tungstênio entre 4,5 e 6,75%, Cromo entre 3,75 e 4,50% além de Vanádio. O Carbono é mantido entre 0,15 e 0,45%.

Série L (Aços Baixa Liga para propósitos especiais):

A inicial “L” provém de “Low”, do inglês, que se refere à baixa liga, apresenta na composição química teores baixos de Cromo e Manganês, podendo conter ainda, em alguns casos, pequenos teores de Vanádio, Molibdênio, Tungstênio ou Níquel.

Apresentam teor de Carbono entre 0,45 e 1,00%, Cromo entre 0,60 e 1,20% e Manganês entre 0,10 e 0,80%. O Cromo contribui para a resistência ao desgaste, e juntamente com Molibdênio e Manganês, aumentam a temperabilidade, permitindo a têmpera em óleo. Estes aços apresentam apenas razoável estabilidade dimensional. São normalmente temperados em água.

Série P (Aços para Moldes de Plásticos):

O Cromo e o Níquel são os principais elementos de liga destes aços para moldes de plásticos. Apresentam teores baixíssimos de Carbono (normalmente entre 0,05 e 0,10%), caracterizam-se pela dureza excepcionalmente baixa na condição de recozidos permitindo a usinagem e a prensagem na forma desejada. Em seguida, são normalmente cementados, temperados e revenidos. Os teores de Cromo variam desde 0,40 até 2,00% e Níquel entre 0,10 e 4,25%.

TABLE 1 Chemical Requirements, %^a

UNS Designation ^b	Type	Carbon	Manganese ^c	Phosphorus, max	Sulfur, max	Silicon	Chromium	Vanadium	Tungsten	Molybdenum	Other Elements
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
T20810	H10	0.35	0.45	0.20	0.70	0.030	0.030	0.80	1.25	3.00	3.75
T20811	H11	0.33	0.43	0.20	0.60	0.030	0.030	0.80	1.25	4.75	5.50
T20812	H12	0.30	0.40	0.20	0.60	0.030	0.030	0.80	1.25	4.75	5.50
T20813	H13	0.32	0.45	0.20	0.60	0.030	0.030	0.80	1.25	4.75	5.50
T20814	H14	0.35	0.45	0.20	0.60	0.030	0.030	0.80	1.25	4.75	5.50
T20819	H19	0.32	0.45	0.20	0.50	0.030	0.030	0.15	0.50	4.00	4.75
T20821	H21	0.26	0.36	0.15	0.40	0.030	0.030	0.15	0.50	3.00	3.75
T20822	H22	0.30	0.40	0.15	0.40	0.030	0.030	0.15	0.40	1.75	3.75
T20823	H23	0.25	0.35	0.15	0.40	0.030	0.030	0.15	0.50	11.00	12.75
T20824	H24	0.42	0.53	0.15	0.40	0.030	0.030	0.15	0.40	2.50	3.50
T20825	H25	0.22	0.32	0.15	0.40	0.030	0.030	0.15	0.40	3.75	4.50
T20826	H26	0.45	0.55 ^d	0.15	0.40	0.030	0.030	0.15	0.40	3.75	4.50
T20841	H41	0.60	0.75 ^e	0.15	0.40	0.030	0.030	0.20	0.45	3.50	4.00
T20842	H42	0.55	0.70 ^e	0.15	0.40	0.030	0.030	0.20	0.45	3.75	4.50
T20843	H43	0.50	0.65 ^e	0.15	0.40	0.030	0.030	0.20	0.45	4.50	5.50
T30102	A2	0.95	1.05	0.40	1.00	0.030	0.030	0.10	0.50	4.75	5.50
T30103	A3	1.20	1.30	0.40	0.60	0.030	0.030	0.10	0.70	4.75	5.50
T30104	A4	0.95	1.05	1.80	2.20	0.030	0.030	0.10	0.70	0.90	2.20
T30105	A5	0.95	1.05	2.80	3.20	0.030	0.030	0.10	0.70	0.90	1.40
T30108	A6	0.65	0.75	1.80	2.50	0.030	0.030	0.10	0.70	0.90	1.40
T30107	A7	2.00	2.85	0.20	0.80	0.030	0.030	0.10	0.70	5.00	5.75
T30108	A8	0.50	0.60	0.20	0.50	0.030	0.030	0.75	1.10	4.75	5.50
T30109	A9	0.45	0.55	0.20	0.50	0.030	0.030	0.95	1.15	4.75	5.50
T30110	A10	1.25	1.50	1.50	2.10	0.030	0.030	1.00	1.50	1.20	1.80
T30402	D2	1.40	1.60	0.10	0.60	0.030	0.030	0.10	0.50	11.00	13.00
T30403	D3	2.00	2.35	0.10	0.60	0.030	0.030	0.10	0.60	11.00	13.50
T30404	D4	2.05	2.40	0.10	0.60	0.030	0.030	0.10	0.60	11.00	13.00
T30405	D5	1.40	1.60	0.10	0.60	0.030	0.030	0.10	0.60	11.00	13.00
T30407	D7	2.15	2.50	0.10	0.60	0.030	0.030	0.10	0.60	11.50	13.50
T31501	O1	0.85	1.00	1.00	1.40	0.030	0.030	0.10	0.50	0.40	0.70
T31502	O2	0.85	0.95	1.40	1.80	0.030	0.030	...	0.50	1.00	1.30
T31506	O8	1.25	1.55	0.30	1.10	0.030	0.030	0.55	1.50	...	0.20
T31507	O7	1.10	1.30	0.20	1.00	0.030	0.030	0.10	0.60	0.35	0.30
T41901	S1	0.40	0.55	0.10	0.40	0.030	0.030	0.15	1.20	1.00	1.50
T41902	S2	0.40	0.55	0.30	0.50	0.030	0.030	0.90	1.20	...	0.50
T41904	S4	0.50	0.65	0.50	0.95	0.030	0.030	1.75	2.25	0.10	0.35
T41905	S5	0.50	0.65	0.50	1.00	0.030	0.030	1.75	2.25	0.10	0.35
T41906	S6	0.40	0.50	1.20	1.50	0.030	0.030	2.00	2.50	1.20	1.50
T41907	S7	0.45	0.55	0.20	0.90	0.030	0.030	0.20	1.00	3.00	3.50
T51202	L2	0.45	1.00 ^e	0.10	0.90	0.030	0.030	0.10	0.50	0.70	1.00
T51203	L3	0.95	1.10	0.25	0.80	0.030	0.030	0.10	0.50	1.30	1.70
Nickel											
T51206	L6	0.65	0.75	0.25	0.80	0.030	0.030	0.10	0.50	1.20	2.00
T50801	F1	0.95	1.25	...	0.50	0.030	0.030	0.10	0.50	1.00	1.75
T50802	F2	1.20	1.40	0.10	0.50	0.030	0.030	0.10	0.50	2.00	4.50
T51602	P2	...	0.10	0.10	0.40	0.030	0.030	0.10	0.40	1.25	3.00
T51603	P3	...	0.10	0.20	0.60	0.030	0.030	0.40	0.40	0.75	1.50
T51604	P4	...	0.12	0.20	0.60	0.030	0.030	0.10	0.40	4.00	5.25
T51605	P5	0.06	0.10	0.20	0.60	0.030	0.030	0.10	0.40	2.00	2.50
T51606	P6	0.05	0.15	0.35	0.70	0.030	0.030	0.10	0.40	1.25	1.75
T51620	P20	0.28	0.40	0.50	1.00	0.030	0.030	0.20	0.80	2.00	3.00
T51621	P21 ^e	0.18	0.22	0.20	0.40	0.030	0.030	0.20	0.40	0.30	0.55
										...	3.90
											4.25

^a Chemistry limits include product analysis tolerances. Unless otherwise specified, nickel plus copper equal 0.75 % max for all types.^b Manganese limit is 1.0 % max for H13 resulfurized.^c Where specified, sulfur may be 0.06 to 0.15 % to improve machinability.^d New designation established in accordance with Practice E 527 and SAEJ1086. Recommended Practice for Numbering Metals and Alloys (UNS).^e Available in several carbon ranges.^f Also contains 1.05-1.25 % aluminum.

Figura 5.10 – Composição química dos aços ferramenta ligados, conforme ASTM A681.

Série T (Aços Rápidos ao Tungstênio):

Os aços rápidos recebem esse nome pela propriedade de resistência à perda da dureza frente ao calor especialmente produzido em operação, pelo atrito nos processos de usinagem a grandes velocidades de corte e pesados avanços. Esta propriedade de dureza a quente subsiste até temperaturas superiores a 500°C.

A série T corresponde à série ao Tungstênio e o teor de Carbono fica em torno de 0,65 a 1,60%, suficiente para gerar elevada fração de carbonetos ao Tungstênio e demais elementos de liga, que conferem resistência à abrasão. O teor de Tungstênio está entre 11,75 e 21,00%. O Cromo está entre 3,75 e 5,00%, podendo conter ainda elementos como Molibdênio e Vanádio.

Os aços desta série apresentam alta temperabilidade, e são temperados a partir do resfriamento ao ar. O Vanádio em teor entre 0,80 a 5,25% proporciona elevação na fração de carbonetos, entretanto, pode levar ao aparecimento de austenita retida após a têmpera.

Série M (Aços Rápidos ao Molibdênio):

São aços ferramenta que contém entre 3,25 e 11,00% de Molibdênio, além de Cromo entre 3,50 e 4,75%, Tungstênio desde 1,15 até 10,50% e 0,95 a 3,75% Vanádio. O Cobalto pode ser introduzido à composição do aço. O teor de Carbono varia entre 0,78 a 1,52%.

Comparativamente aos aços rápidos da série T, os aços da série M apresentam resistência à abrasão similar, entretanto, melhor tenacidade. Um inconveniente desta série é que são mais susceptíveis à descarbonetação durante tratamento térmico.

A figura 5.11 apresenta a composição química dos aços rápidos (séries T e M), conforme norma ASTM A600.

A 600

TABLE 1 Chemical Requirements, %^a

UNS Designation ^b	Type	Carbon		Manganese		Phosphorus	Sulfur ^c	Silicon		Chromium		Vanadium		Tungsten		Molybdenum		Cobalt		
		min	max	min	max			min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	
Tungsten-Type High-Speed Steels																				
T12001	T1	0.85	0.80	0.10	0.40	0.03	0.03	0.20	0.40	3.75	4.50	0.90	1.30	17.25	18.75	...	...	...	...
T12002	T2	0.80	0.90	0.20	0.40	0.03	0.03	0.20	0.40	3.75	4.50	1.80	2.40	17.50	19.00	...	1.00	...	...
T12004	T4	0.70	0.80	0.10	0.40	0.03	0.03	0.20	0.40	3.75	4.50	0.80	1.20	17.50	19.00	0.40	1.00	4.25	5.75	
T12005	T5	0.75	0.85	0.20	0.40	0.03	0.03	0.20	0.40	3.75	5.00	1.80	2.40	17.50	19.00	0.50	1.25	7.00	9.50	
T12006	T6	0.75	0.85	0.20	0.40	0.03	0.03	0.20	0.40	4.00	4.75	1.50	2.10	18.50	21.00	0.40	1.00	11.00	13.00	
T12008	T8	0.75	0.85	0.20	0.40	0.03	0.03	0.20	0.40	3.75	4.50	1.80	2.40	13.25	14.75	0.40	1.00	4.25	5.75	
T12015	T15	1.50	1.50	0.15	0.40	0.03	0.03	0.15	0.40	3.75	5.00	4.50	5.25	11.75	13.00	...	1.00	4.75	5.25	
Molybdenum-Type High-Speed Steels																				
T11301	M1	0.78	0.88	0.15	0.40	0.03	0.03	0.20	0.50	3.50	4.00	1.00	1.35	1.40	2.10	8.20	9.20	...	...
T11302	M2	regular C	0.78	0.88	0.15	0.40	0.03	0.03	0.20	0.45	3.75	4.50	1.75	2.20	5.50	6.75	4.50	5.50
		high C	0.95	1.05	0.15	0.40	0.03	0.03	0.20	0.45	3.75	4.50	1.75	2.20	5.50	6.75	4.50	5.50
T11313	M3	Class 1	1.00	1.10	0.15	0.40	0.03	0.03	0.20	0.45	3.75	4.50	2.25	2.75	5.00	6.75	4.75	6.50
T11323		Class 2	1.15	1.25	0.15	0.40	0.03	0.03	0.20	0.45	3.75	4.50	2.75	3.25	5.00	6.75	4.75	6.50
T11304	M4	1.25	1.40	0.15	0.40	0.03	0.03	0.20	0.45	3.75	4.50	3.75	4.50	5.25	6.50	4.25	5.50	...	...
T11306	M6	0.75	0.85	0.15	0.40	0.03	0.03	0.20	0.45	3.75	4.50	1.30	1.70	3.75	4.75	4.50	5.50	11.00	13.00	
T11307	M7	0.97	1.05	0.15	0.40	0.03	0.03	0.20	0.55	3.50	4.00	1.75	2.25	1.40	2.10	8.20	9.20	...	...
T11310	M10	regular C	0.84	0.94	0.10	0.40	0.03	0.03	0.20	0.45	3.75	4.50	1.80	2.20	...	7.75	8.50	...	...
		high C	0.95	1.05	0.10	0.40	0.03	0.03	0.20	0.45	3.75	4.50	1.80	2.20	...	7.75	8.50	...	...
T11330	M30	0.75	0.85	0.15	0.40	0.03	0.03	0.20	0.45	3.50	4.25	1.00	1.40	1.30	2.30	7.75	9.00	4.50	5.50	
T11333	M33	0.85	0.92	0.15	0.40	0.03	0.03	0.15	0.50	3.50	4.00	1.00	1.35	1.30	2.10	9.00	10.00	7.75	8.75	
T11334	M34	0.85	0.92	0.15	0.40	0.03	0.03	0.20	0.45	3.50	4.00	1.90	2.30	1.40	2.10	7.75	9.20	7.75	9.75	
T11336	M36	0.80	0.90	0.15	0.40	0.03	0.03	0.20	0.45	3.75	4.50	1.75	2.25	5.50	6.50	4.50	5.50	7.75	8.75	
T11341	M41	1.05	1.15	0.20	0.60	0.03	0.03	0.15	0.50	3.75	4.50	1.75	2.25	6.25	7.00	3.25	4.25	4.75	5.75	
T11342	M42	1.05	1.15	0.15	0.40	0.03	0.03	0.15	0.65	3.50	4.25	0.95	1.35	1.15	1.85	9.00	10.00	7.75	8.75	
T11343	M43	1.15	1.25	0.20	0.40	0.03	0.03	0.15	0.65	3.50	4.25	1.50	1.75	2.25	3.00	7.50	8.50	7.75	8.75	
T11344	M44	1.10	1.20	0.20	0.40	0.03	0.03	0.30	0.55	4.00	4.75	1.85	2.20	5.00	5.75	6.00	7.00	11.00	12.25	
T11346	M46	1.22	1.30	0.20	0.40	0.03	0.03	0.40	0.65	3.70	4.20	3.00	3.30	1.90	2.20	8.00	8.50	7.80	8.80	
T11347	M47	1.05	1.15	0.15	0.40	0.03	0.03	0.20	0.45	3.50	4.00	1.15	1.35	1.30	1.80	9.25	10.00	4.75	5.25	
...	M48	1.42	1.52	0.15	0.40	0.03	0.07	0.15	0.40	3.50	4.00	2.75	3.25	9.50	10.50	4.75	5.50	8.00	10.00	
...	M62	1.25	1.35	0.15	0.40	0.03	0.07	0.15	0.40	3.50	4.00	1.80	2.10	5.75	6.50	10.00	11.00	...	...
Intermediate High Speed Steels																				
T11350	M50	0.78	0.88	0.15	0.45	0.03	0.03	0.20	0.80	3.75	4.50	0.80	1.25	...	...	3.90	4.75	...	...
T11352	M52	0.85	0.95	0.15	0.45	0.03	0.03	0.20	0.60	3.50	4.30	1.65	2.25	0.75	1.50	4.00	4.90	...	...

^a Chemistry limits include product analysis tolerances. Unless otherwise specified, nickel plus copper equals 0.75 % max for all types.^b New designation established in accordance with Practice E 527 and SAE J1086.^c Where specified, sulfur may be 0.06 to 0.15 % to improve machinability.

Figura 5.11 – Composição química dos aços ferramenta rápidos, conforme ASTM A600.

Outra forma amplamente utilizada para classificar os aços é o sistema adotado pela ASTM (American Society for Testing and Materials) ou ainda pela ASME (American Society of Mechanical Engineers). De forma geral, estas especificações representam o consenso entre produtores de aço, especificadores e usuários finais (indústria da transformação).

Produtos de aço podem ser identificados pelo número da especificação ASTM ao qual corresponde. O número consiste de uma letra A (para materiais Ferrosos) seguido de um número serial arbitrário atribuído.

Tabela 5.2 - Classificação ASTM para aços planos ao Carbono.

Especificação ASTM	Descrição ^(b)	Composição (% em peso) ^(a)				
		C	P	Mn	S	Outros
A 611 (CR SQ)	Grau A, B, C, E	0,20	0,6	0,04	0,04	(c)
	Grau D, Tipo 1	0,20	0,9	0,04	0,04	(c)
	Grau D, Tipo 2	0,15	0,6	0,20	0,04	(c)
A 366	CR CQ	0,15	0,6	0,035	0,04	(c)
A 109 (CR STRIP)	Recozidos 1, 2, 3	0,25	0,6	0,035	0,04	(c)
	Recozidos 4 e 5	0,15	0,6	0,035	0,04	(c)
A 619	CR DQ	0,10	0,50	0,025	0,035	(c)
A 620	CR DQSK	0,10	0,50	0,025	0,035	(d)
A 570 (HR SQ)	Graus 30, 33, 36 e 40	0,25	0,9	0,04	0,05	(c)
	Graus 45, 50 e 55	0,25	1,35	0,04	0,05	(c)
A 569	HR CQ	0,15	0,6	0,035	0,040	(c)
A 621	HR DQ	0,10	0,50	0,025	0,035	---
A 622	HR DQSK	0,10	0,50	0,025	0,035	(d)
A 414 (Vasos de Pressão)	Grau A	0,15	0,9	0,035	0,040	(c)
	Grau B	0,22	0,90	0,035	0,040	(c)
	Grau C	0,25	0,90	0,035	0,040	(c)
	Grau D	0,25	1,20	0,035	0,040	(c) (e)
	Grau E	0,27	1,20	0,035	0,040	(c) (e)
	Grau F	0,31	1,20	0,035	0,040	(c) (e)
	Grau G	0,31	1,35	0,035	0,040	(c) (e)

(a) Valores máximos dos elementos, (b) CR, Cold Rolled (laminado à frio), HR, Hot Rolled (laminado a quente), SQ, Structural Quality (qualidade estrutural), DQ, Drawing Quality (qualidade estampagem), DQSK, Drawing Quality, Special Killed (qualidade estampagem especialmente acalmado), CQ, Commercial Quality (qualidade comercial). (c) Cobre, quando especificado para buchas de aço, em teores de 0,20 % mínimo. (d) Alumínio como desoxidante, normalmente excede a 0,010% no produto. (e) Aço acalmado pode ser fornecido quando requisitado pelo cliente, nos graus D até G. Quando o aço acalmado ao Silício for especificado, uma faixa de 0,15 a 0,30% Si deverá ser fornecido.

Normalmente estes aços classificados por composição química podem ser suportados por outras normas, as quais determinam as propriedades mecânicas dos aços.

Nestes casos, os aços recebem diversos requisitos especiais de garantia para as suas propriedades e são, portanto, de custo mais elevado de produção.

Em adição às normas de especificação, que determinam a composição química dos aços e, em diversos casos, as propriedades requeridas para cada grau ou especificação, devem ser cuidadosamente analisadas e escolhidas as normas de tolerâncias dimensionais e de forma dos produtos siderúrgicos. Estas características podem ser tão importantes quanto às de composição química e propriedades, uma vez que o processo de transformação mecânica juntamente com o projeto dos componentes determinará as tolerâncias requeridas.

6 - Aplicações

A seguir será apresentada uma série de especificações e exemplos de aplicações práticas da indústria.

- Usos Gerais e Relaminação: SAE 1006 a 1022, NBR 6658, ASTM A569. (Aços de Conformabilidade Básica):



Figura 6.1 - Tubos e chapas.



Figura 6.2 - Peças levemente conformadas

- Aços para Estampagem: NBR5906 / EM/EP/EPA, ASTM A621/ A622, JIS G3131, EN10111. (Aços de Estampagem média a extra-profunda):



Figura 6.3 - Botijões e Corpos de compressores de refrigeradores



Figura 6.4 - Compressores

- **Estrutural com Boa Conformabilidade:** ASTMA36, ASTMA570, NBR8267, SAEJ1392, NBR6655, NBR6656. (Aços com média estampabilidade, alta resistência mecânica e boa soldabilidade):



Figura 6.5 - Longarinas, Barras de Reforço Lateral, Rodas, Tubulações.

- Estrutural Resistente à Corrosão Atmosférica:** ASTM A242, CSN COR 420, 480 e 500. (Aços com Alta resistência mecânica com excelente resistência a corrosão atmosférica).



Figura 6.6 - Construção Civil.



Figura 6.7 - Implementos Agrícolas e Torres de Celular

- Estrutural de Alta Resistência: ASTM A607, ASTM A572, CSN ARC600, CSN IA25,. (Aços com capacidade de conformação e alta resistência mecânica).



Figura 6.8 - Chassis Automotivos e Implementos Agrícolas

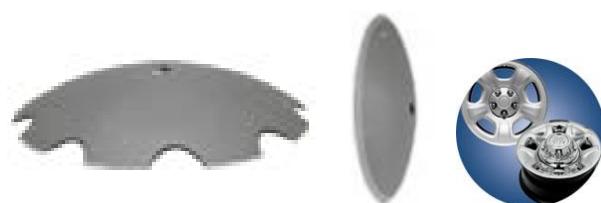


Figura 6.9 - Rodas e Discos para Implementos Agrícolas

Aços para Construção Mecânica: CSN AC25 / 45 / 50 / 60 / 70 (Aços de médio e alto Carbono, sem adição de microligantes).



Figura 6.10 - Aços para Corte e Componentes Especiais.

Aços para Construção Mecânica: Aços médio Carbono ligados.



Figura 6.11 – Aços Liga ou Aços para Construção Mecânica.

- Aços Inoxidáveis



Figura 6.12 - Aços Inoxidáveis para Utilidades Domésticas.



Figura 6.13 - Aços Inoxidáveis para a Linha Branca.

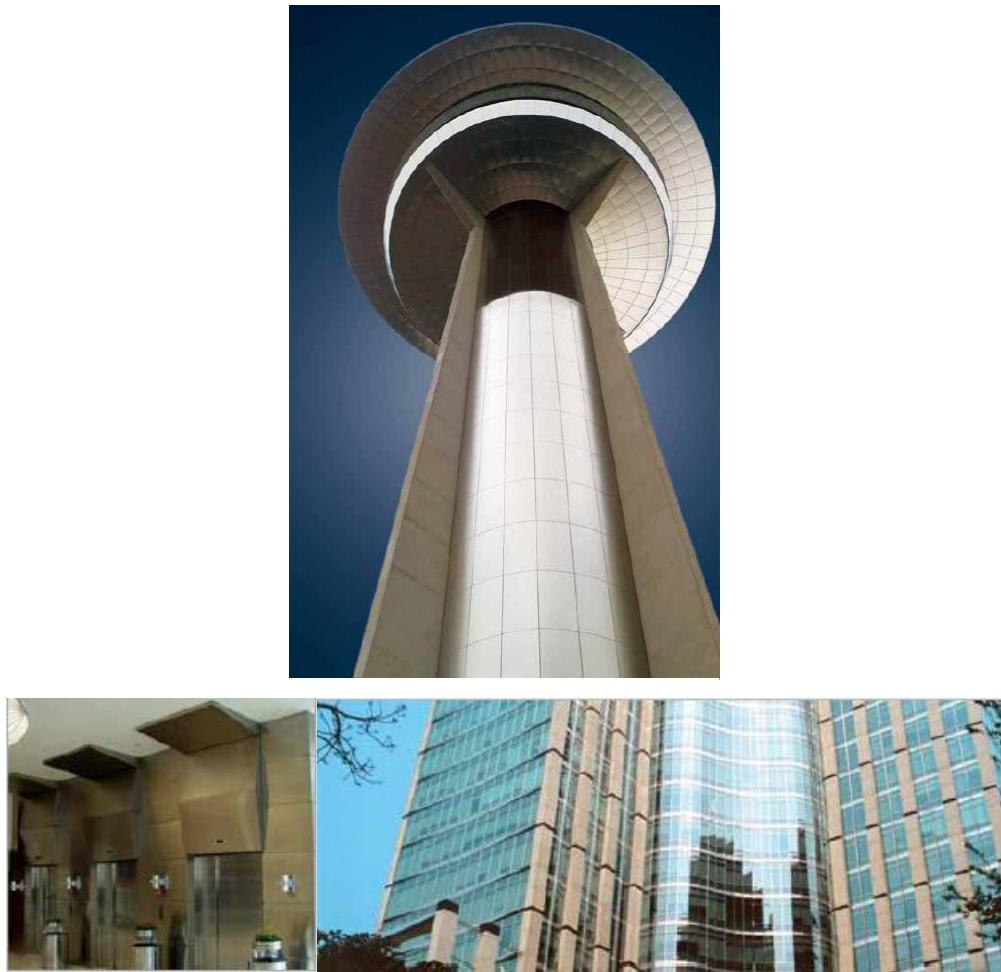


Figura 6.14 - Aços Inoxidáveis para a Construção Civil.



Figura 6.15 - Aços Inoxidáveis para a Automobilística.

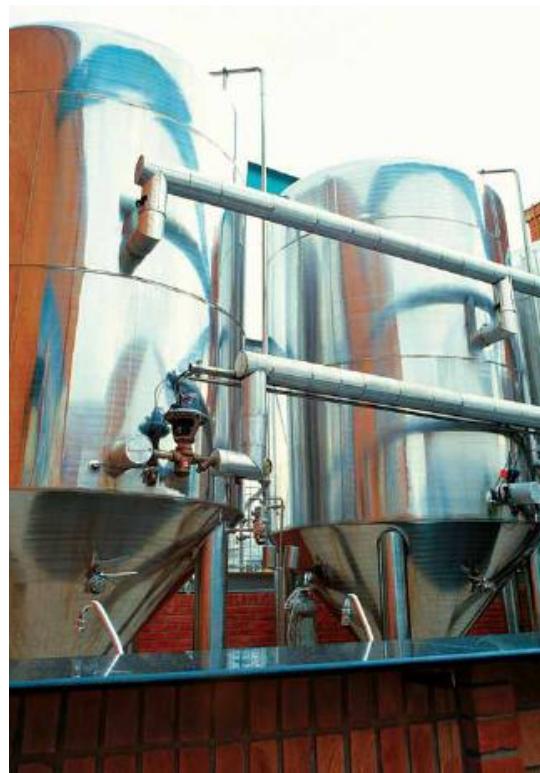


Figura 6.16 – Aços Inoxidáveis para a Indústria.

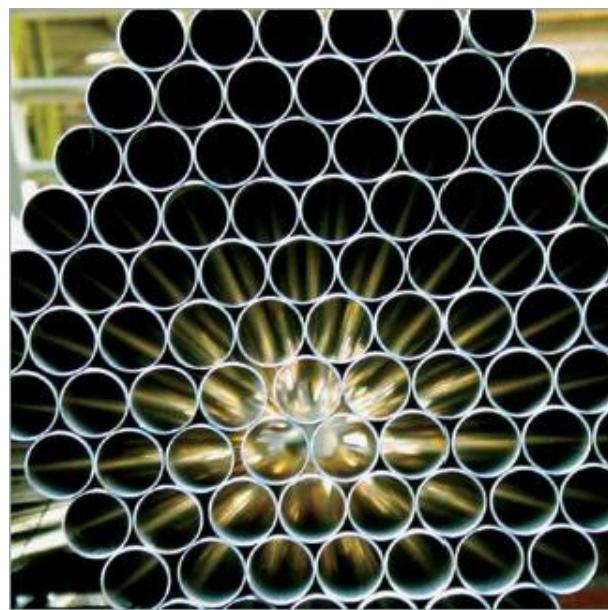


Figura 6.17 – Aços Inoxidáveis para Tubulações.

Aplicações

AISI	ASTM (UNS)	Acesita	Principais Aplicações
------	------------	---------	-----------------------

AUSTENÍTICOS

301	S30100	P301A	Utilizado para fins estruturais, em equipamentos para indústria alimentícia, aeronáutica, ferroviária, naval, petroquímica, de papel e celulose, têxtil, frigorífica, hospitalar, alimentícia, laticínios, farmacéutica, cosmética, química, utensílios domésticos, instalações criogênicas, destilarias, fotografia, tubos e tanques em geral, estampagem geral e profunda.
304	S30400	P304A	Equipamentos para indústria aeronáutica, ferroviária, naval, petroquímica, de papel e celulose, têxtil, frigorífica, hospitalar, alimentícia, laticínios, farmacéutica, cosmética, química, utensílios domésticos, instalações criogênicas, destilarias, fotografia, tubos e tanques em geral, estampagem geral, profunda e de precisão.
304	S30400	P304N/P304T ⁽¹⁾	Equipamentos para indústria aeronáutica, ferroviária, naval, petroquímica, de papel e celulose, têxtil, frigorífica, hospitalar, alimentícia, laticínios, farmacéutica, cosmética, química, utensílios domésticos, instalações criogênicas, destilarias, fotografia, tubos e tanques em geral, estampagem geral, profunda e de precisão.
304L	S30403	P304C/D	Equipamentos para indústria aeronáutica, ferroviária, naval, petroquímica, de papel e celulose, têxtil, frigorífica, hospitalar, alimentícia, laticínios, farmacéutica, cosmética, química, utensílios domésticos, instalações criogênicas, destilarias, fotografia, tubos e tanques em geral, estampagem geral e profunda.
304H	S30409	P304H ⁽²⁾	Equipamentos para indústria petroquímica, de papel e celulose, têxtil, frigorífica, hospitalar, alimentícia, laticínios, farmacéutica, cosmética, química, instalações criogênicas, destilarias, fotografia, tubos e tanques em geral. Equipamentos onde exige-se maior resistência em altas temperaturas aliadas a maiores exigências de soldabilidade.
316	S31600	P316B	Construção civil e uso arquitetural, equipamentos para indústria aeronáutica, ferroviária, naval, química e petroquímica, farmacéutica, cosmética, têxtil, borracha, tintas, laticínios, hospitalar, de mineração, siderúrgica, refrigeração, refinarias, tubos e vasos de pressão, destilarias de álcool, caldearia.
316L	S31603	P316B	Construção civil e uso arquitetural, equipamentos para indústria aeronáutica, ferroviária, naval, química e petroquímica, farmacéutica, cosmética, têxtil, borracha, tintas, laticínios, hospitalar, de mineração, siderúrgica, refrigeração, refinarias, fabricação de tubos e vasos de pressão, destilarias de álcool, caldearia.
321	S32100	P321A	Componentes termorresistentes em indústria elétrica, componentes soldados, indústria alimentícia, tubos e tanques em geral.

NOTAS:

1. 304N: 304T = 304000

2. Aplicável somente em chapas grossas (espessura maior que 6,00 mm).

FERRÍTICOS

409	S40910	P409A	Sistemas de exaustão de gases em motores de explosão e estampagem em geral, além de caixas de capacitores.
430	S43000	P430A	Utensílios domésticos (baixelas, pias e talheres), eletrodomésticos (fogões, geladeiras, fornos de microondas e lavadoras), cunhagem de moedas e balcões frigoríficos.
-	S43000	P430E ⁽¹⁾	Utensílios domésticos (baixelas, pias e talheres), cunhagem de moedas, balcões frigoríficos, estampagem geral e profunda.
-	S43932	P439A	Usinas de açúcar e álcool, sistema de exaustão (tubos silenciosos), eletrodomésticos (máquinas de lavar roupas, fogões, fornos de microondas) e estampagem geral.
-	-	P441A	Sistema de exaustão (tubos), estampagem (corpo catalisador, silencioso, etc.).
-	S44400	P444A	Usinas de açúcar, caixas d'água, aquecedores residenciais de água e aplicações em indústria química e petroquímica.

NOTA:

1. 430DDQ

MARTENSÍTICOS

420	S42000	P420A	Cutelaria, instrumentos de medição, hospitalares, odontológicos e cirúrgicos, áreas de mineração, siderúrgica, além de lâminas de corte e discos de freios, facas, lâminas e correntes para máquinas de lavar garrafas.
-	-	P498V	Cutelaria profissional (frigoríficos, abatedouros e açougueiros).

Figura 6.18 – Aços Inoxidáveis – Sumário de Aplicações.

- Aços Ferramenta

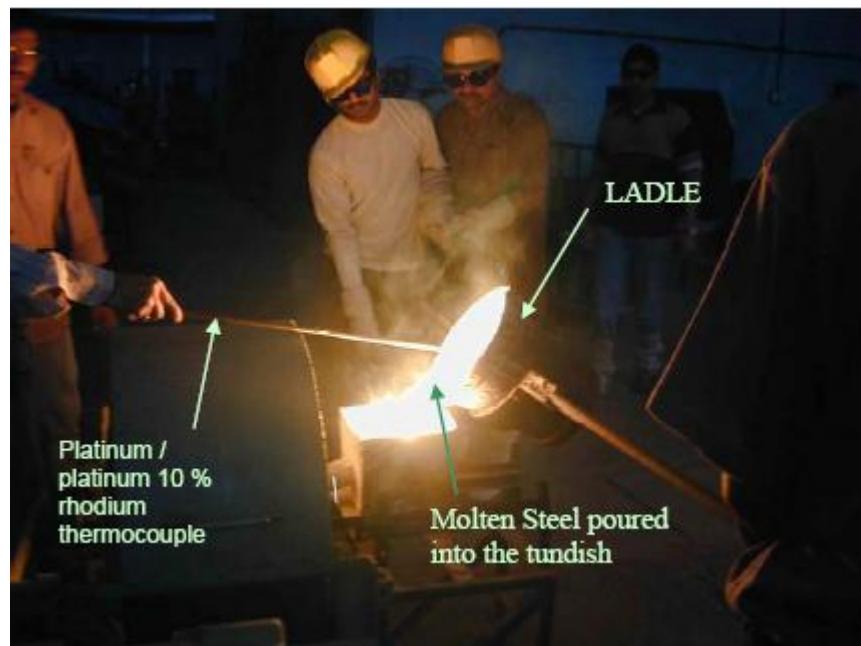


Figura 6.19 – Aços Ferramenta para moldes de fundição.



Figura 6.20 – Aços Ferramenta para moldes de fundição.



Figura 6.21 – Aços Ferramenta para moldes de fundição de Alumínio (Coqueira fechada durante vazamento).



Figura 6.22 – Aços Ferramenta para moldes de fundição de Alumínio (coqueira aberta).

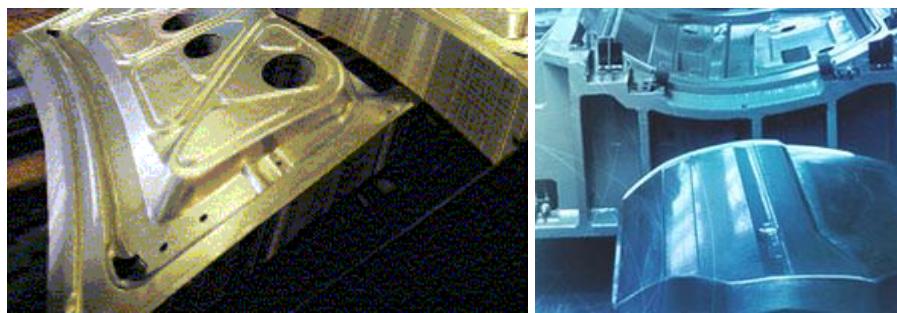


Figura 6.23 – Aços Ferramenta para matrizes de estampagem.



Figura 6.24 – Prensas para estampagem.

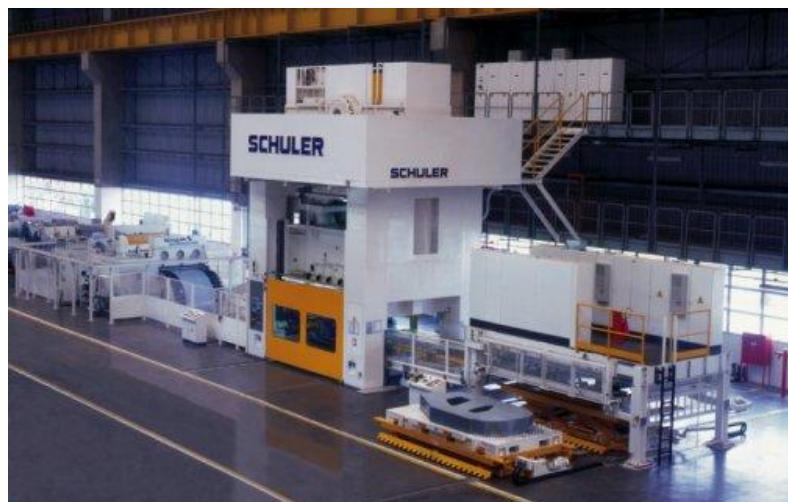


Figura 6.25 – Prensas para corte de blanks.

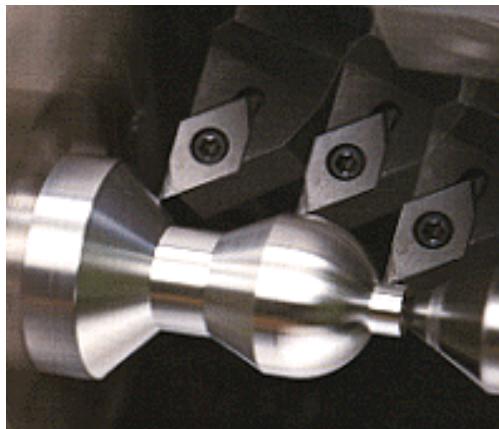


Figura 6.26 – Ferramentas de usinagem (Aços Rápidos).