



ISEL

I
S
E
L



D E E C

ÁREA DEPARTAMENTAL DE ENGENHARIA CIVIL

Mestrado em Engenharia Civil



Aço em varão para betão armado - Caracterização do material e enquadramento atual

David Botelho Perdigão Bento

Dissertação para obtenção do grau de mestre em
Engenharia Civil

Orientadora: Doutora Maria Dulce e Silva Franco Henriques

Júri

Presidente: Engenheiro Manuel Brazão de Castro Farinha

Vogais: Doutora Maria Dulce e Silva Franco Henriques

Doutor Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva

Dezembro 2014

Resumo

Este trabalho pretende aprofundar o estudo das características do aço em varão para betão armado, sendo feita uma caracterização exaustiva do material, onde se pretende estudar quais os seus constituintes, as suas características físico-mecânicas e a história das tecnologias de produção de aço até aos dias de hoje.

É também abordada a situação em Portugal, nomeadamente os métodos utilizados atualmente na produção de aço e que tipo de aço é utilizado para a produção de varões para betão armado.

É feito um breve apanhado histórico da legislação aplicada ao comportamento do aço para betão armado e são listados todos os documentos legais aplicáveis a varões de aço, procedendo-se depois a uma descrição mais elaborada dos mesmos.

É descrita a forma como os varões de aço são aplicados em obra, nomeadamente as regras a respeitar no processo de receção em obra e a qualidade de execução dos trabalhos. São também abordadas as principais questões relacionadas com a metodologia utilizada na montagem de armaduras em estruturas de Betão Armado.

Palavras-chave: Varões de aço; betão armado; produção de aço.

Abstract

This paper tries to achieve a better understanding of the characteristics of steel bars for reinforced concrete, being made an exhaustive material characterization, where it intends to study its constituents, its characteristics and the history of steel production technologies until the present day.

It is also discussed the situation in Portugal, including the methods currently used in steel production and what kind of steel is used to produce steel bars.

It is made a brief of an historical overview about applied legislation of reinforcing steel behavior and is listed all the legal documents applicable to steel bars, proceeding after to a more detailed description of them.

Is described how steel bars are applied in work, including the rules of receipt in the field and the quality work execution. It is also discussed the main issues related with the methodology used in the assembly of reinforced concrete structures armor.

Key words: Steel bars; reinforced concrete; steel production.

Agradecimentos

Tratando-se a presente dissertação de mais uma etapa importante no meu percurso académico e pessoal, quero aqui deixar o meu sincero obrigado a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a concretização deste objetivo.

Agradeço à Engenheira Dulce Franco Henriques por todo o auxílio prestado ao longo deste trabalho e em especial pela paciência demonstrada para ler, reler e apresentar sugestões para que este texto se tornasse algo coeso e com valor.

Aos meus amigos Rui Eugénio e Bruno Miguel, que ao longo deste percurso foram como verdadeiros irmãos e aos meus tios Carlos Pereira e Mariana Calado pelo apoio prestado durante o meu percurso académico.

A todos os colegas com quem partilhei o tempo durante os anos que frequentei o Mestrado em Engenharia Civil nesta Instituição, assim como a todos os Professores que ao longo dos anos contribuíram para a minha formação.

Aos meus pais, pois se hoje cheguei onde estou foi em grande parte graças a eles, e a pessoa que sou também se deve aos seus ensinamentos e exemplos de vida.

Índice Geral

| | |
|---|----|
| Resumo..... | 2 |
| Abstract..... | 3 |
| Agradecimentos..... | 4 |
| Índice Geral..... | 5 |
| 1. Introdução e objetivos..... | 12 |
| 2. Propriedades gerais do aço..... | 14 |
| 2.1 – Considerações gerais..... | 14 |
| 2.2 – Microestruturas na aço..... | 14 |
| 2.3 – Diagrama de fases Ferro – Carboneto de Ferro..... | 19 |
| 2.4 – Processo de desoxigenação..... | 20 |
| 2.5 – Principais tipos de aços utilizados em engenharia civil..... | 21 |
| 3. Levantamento dos processos industriais..... | 26 |
| 3.1 – História do Aço..... | 26 |
| 3.2 – Processos industriais desenvolvidos para a obtenção de aço..... | 29 |
| 3.2.1 – Alto-forno..... | 29 |
| 3.2.2 – Processo de Bessemer..... | 30 |
| 3.2.3 – Processo de Siemens-Martin..... | 31 |
| 3.2.4 – Forno de arco elétrico..... | 32 |
| 3.2.5 – Processo de Linz-Donawitz..... | 34 |
| 3.2.6 – Processos de Kaldo e Rotor..... | 35 |
| 3.3 – Tipo de tratamento dos aços em varão..... | 35 |
| 3.3.1 – Tratamentos mecânicos (a frio) e termomecânicos..... | 36 |
| 3.3.1.1 – Laminagem..... | 36 |
| 3.3.1.2 – Estiramento..... | 37 |
| 3.3.1.3 – Trefilagem..... | 37 |
| 3.3.2 – Tratamentos térmicos..... | 38 |
| 3.3.2.1 – Recozimento..... | 38 |
| 3.3.2.2 – Têmpera..... | 40 |
| 3.3.2.3 – Normalização..... | 42 |
| 3.3.2.4 – Revenido..... | 43 |
| 3.4 - Produção atual..... | 43 |
| 3.4.1 – Impacto ambiental..... | 44 |
| 3.4.2 – Produção de aço em Portugal..... | 45 |
| 3.5 - Dados estatísticos acerca da indústria do aço..... | 48 |
| 4. Normas e legislação aplicáveis a varões de aço..... | 52 |
| 4.1 – Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado..... | 53 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 4.2 | – prEN 10080 – Steel for the reinforcement of concrete..... | 55 |
| 4.3 | – NP EN 1992-1-1:2010 EC2 - Projeto de Estruturas de Betão..... | 56 |
| 4.4 | – Dec. Lei 390/2007..... | 59 |
| 4.5 | – NP EN 13670:2011 – Execução de estruturas de betão..... | 60 |
| 4.5.1 | – Materiais..... | 60 |
| 4.5.2 | – Transporte e armazenamento..... | 61 |
| 4.5.3 | – Inspeção e ensaio de armaduras..... | 62 |
| 4.5.3.1 | – Classes de execução das construções..... | 62 |
| 4.5.3.2 | – Receção das armaduras em obra..... | 63 |
| 4.5.3.3 | – Inspeção das armaduras antes da betonagem..... | 64 |
| 4.6 | – Especificações LNEC..... | 66 |
| 4.6.1 | – Processo de fabrico..... | 66 |
| 4.6.2 | – Características mecânicas e tecnológicas..... | 66 |
| 4.6.3 | – Controlo da produção..... | 68 |
| 4.6.4 | – Geometria das nervuras..... | 68 |
| 4.6.5 | – Marcas de identificação..... | 73 |
| 4.7 | – Documentos de classificação LNEC..... | 74 |
| 4.8 | – Análise comparativa da regulamentação..... | 75 |
| 4.8.1 | – Extensão na rotura..... | 75 |
| 4.8.2 | – Tensão de cedência..... | 76 |
| 5. | Aplicação em obra do varão de aço..... | 78 |
| 5.1 | – Metodologia de aplicação..... | 78 |
| 5.1.1 | – Corte e dobragem..... | 78 |
| 5.1.1.1 | – Equipamento..... | 78 |
| 5.1.1.2 | – Metodologia de corte de aço em varão..... | 82 |
| 5.1.1.3 | – Metodologia de dobragem de aço em varão..... | 84 |
| 5.1.2 | – Montagem e colocação de armadura..... | 85 |
| 5.1.2.1 | – Amarração de armaduras..... | 85 |
| 5.1.2.2 | – Montagem de armaduras em estaleiro..... | 88 |
| 5.1.2.3 | – Montagem de armaduras no local de aplicação..... | 91 |
| 5.1.2.4 | – Espaçadores..... | 95 |
| 5.1.2.4.1 | – Espaçadores de betão..... | 102 |
| 5.1.2.4.2 | – Espaçadores de plástico..... | 103 |
| 5.2 | – Procedimentos de segurança na execução de armaduras..... | 105 |
| 5.3 | – Normas de conduta do armador de ferro..... | 105 |
| 6. | CODIMETAL Engineering S.A..... | 106 |
| 7. | Conclusão..... | 108 |
| | Referências Bibliográficas e Bibliografia..... | 110 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Austenite..... | 15 |
| Figura 2 – Ferrite..... | 16 |
| Figura 3 – Cementite..... | 16 |
| Figura 4 – Perlite | 17 |
| Figura 5 – Martensite | 18 |
| Figura 6 – Bainite | 18 |
| Figura 7 - Diagrama de fases Ferro – Carboneto de ferro..... | 19 |
| Figura 8 – Esquema de funcionamento de um alto-forno utilizando coque..... | 27 |
| Figura 9A) – Esquema simplificado do funcionamento de um forno de revérbero | 28 |
| Figura 9B) – Disposição de um forno de revérbero | 28 |
| Figura 10 – Operário a manobrar o agitador num forno de pudelagem..... | 28 |
| Figura 11 – Representação esquemática do alto-forno | 29 |
| Figura 12 – Representação do convertedor de Bessemer | 31 |
| Figura 13 – Forno de Siemens-Martin | 32 |
| Figura 14 – Representação esquemática do forno de arco elétrico | 33 |
| Figura 15 – Representação esquemática do forno Linz-Donawitz | 34 |
| Figura 16 – Representação esquemática da posição dos rolos..... | 36 |
| Figura 17 – Exemplo do modo de arrefecimento de uma peça..... | 41 |
| Figura 18 – Diagramas de arrefecimento para vários tipos de têmpera | 42 |
| Figura 19 – Energia consumida por processo | 44 |
| Figura 20 – Impactes ambientais por processo | 45 |
| Figura 21 – Corte de um varão com as zonas constituídas por diferentes estruturas cristalina..... | 46 |
| Figura 22 – Perfil de dureza para varão de 22mm de diâmetro | 47 |
| Figura 23 – Evolução da produção de varões (em milhões de toneladas/ano) utilizando o processo Tempcore | 48 |
| Figura 24 – Produção mundial de aço no 1º semestre de 2014 | 49 |
| Figura 25 – Produção de aço em bruto em Portugal | 50 |
| Figura 26 – Figura 3.7 do EC2 – Diagramas de tensão-extensão típicos de | |

| | |
|--|----|
| varões de aço laminado a quente (a) e endurecido a frio (b)..... | 58 |
| Figura 27 – Figura 3.8 do EC2 – Diagrama tensão-extensão de cálculo para varões de aço..... | 59 |
| Figura 28 – Exemplo de armazenamento do aço evitando o contacto com o solo | 61 |
| Figura 29 – Diagrama tensão-extensão típico de varões de aço..... | 67 |
| Figura 30 – Corte transversal de um varão nervurado (E450)..... | 69 |
| Figura 31 – Corte transversal de um varão endentado (E456)..... | 69 |
| Figura 32 – Inclinação e afastamento das nervuras Aço A400 NR (E449)..... | 70 |
| Figura 33 – Inclinação e afastamento das nervuras Aço A500 NR (E450)..... | 70 |
| Figura 34 – Inclinação e afastamento das nervuras Aço A400 NR SD (E455)..... | 71 |
| Figura 35 – Inclinação e afastamento das nervuras Aço A500 NR SD (E460)..... | 71 |
| Figura 36 – Inclinação e afastamento das nervuras Aço A500 ER (E456)..... | 71 |
| Figura 37 – Exemplo de código de marcas de identificação..... | 74 |
| Figura 38 – Diferença da definição de extensão de rotura entre o EC2 e as Especificações LNEC e o REBAP..... | 76 |
| Figura 39 – Elementos da máquina de corte e dobragem..... | 78 |
| Figura 40 – Painel de comandos e funções | 79 |
| Figura 41 – Prato de dobragem | 79 |
| Figura 42 – Pino limitador de movimento | 80 |
| Figura 43 – Mesa de moldagem | 80 |
| Figura 44 – Espera da mesa de moldagem | 81 |
| Figura 45 – Posição do veio e batente de espera | 81 |
| Figura 46 – Colocação dos espigões no prato de dobragem | 81 |
| Figura 47– Adoção de casquilhos acessórios | 82 |
| Figura 48 – Colocação do pino limitador | 82 |
| Figura 49 – Pontos de amarração executados em ZIG-ZAG | 87 |
| Figura 50 – Espaçadores na armadura inferior (E469)..... | 97 |
| Figura 51 – Espaçadores da armadura horizontal no bordo acabando em ponta (E469)..... | 98 |
| Figura 52 – Espaçadores da armadura vertical no bordo (E469)..... | 98 |
| Figura 53 – Espaçadores da armadura vertical no bordo com armadura intermédia (E469)..... | 98 |

| | |
|--|-----|
| Figura 54 – Espaçadores da viga em alçado (E469)..... | 99 |
| Figura 55 – Espaçadores em viga alta (E469)..... | 99 |
| Figura 56 – Espaçadores ao longo do pilar (E469)..... | 100 |
| Figura 57 – Espaçadores em secção menor (E469)..... | 100 |
| Figura 58 – Espaçadores em secção maior (E469)..... | 101 |
| Figura 59 – Espaçadores em secção com cintas duplas (E469)..... | 101 |
| Figura 60 – Espaçadores em secção circular (E469)..... | 101 |
| Figura 61 – Espaçadores de betão pré-fabricados | 102 |
| Figura 62 – Dois exemplos de aplicação dos espaçadores de betão..... | 103 |
| Figura 63 – Espaçador circular | 103 |
| Figura 64 – Aplicação do espaçador num pilar | 103 |
| Figura 65 – Tipos de espaçador pontual com fixação..... | 104 |
| Figura 66 – Espaçador pontual com fixação em laje..... | 104 |
| Figura 67 – Espaçador para lajes e vigas | 104 |
| Figura 68 – Tipo de espaçador linear..... | 104 |
| Figura 69 – Espaçador linear aplicado em laje..... | 104 |

Índice de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Especificações e propriedades típicas de aços comuns em construção civil | 23 |
| Tabela 2 – Aços inoxidáveis | 24 |
| Tabela 3 – Os principais mercados de aço em 2013 | 49 |
| Tabela 4 – Quadro V do REBAP – Tiposcorrentes de armaduras ordinárias..... | 54 |
| Tabela 5 – Tabela 3 da EN 10080 – Requisitos para teste de propriedades mecânicas..... | 56 |
| Tabela 6 – Quadro C.1 do EC2 – Propriedades das armaduras..... | 58 |
| Tabela 7 – Classes de execução..... | 62 |
| Tabela 8 – Tipo de inspeção requerido por classe de execução..... | 63 |
| Tabela 9 – Exigências de cada especificação relativas aos ensaios de tração..... | 67 |
| Tabela 10 – Quadro 4 das Especificações E449, E450, E455, e E460 – | |

| | |
|---|----|
| Altura mínima das nervuras transversais..... | 69 |
| Tabela 11 – Quadro 5 das Especificações E450, E455 e E460 – Afastamento das nervuras transversais..... | 72 |
| Tabela 12 – Quadro 5 da Especificação E449 – Afastamento das nervuras transversais..... | 72 |
| Tabela 13 – Quadro 6 das Especificações E450, E455 e E460 – Área relativa das nervuras transversais..... | 73 |
| Tabela 14 – Nº de nervuras para identificação do país de origem dos varões..... | 74 |
| Tabela 15 – Metodologia de corte de aço em varão | 82 |
| Tabela 16 – Metodologia de dobragem de aço em varão..... | 84 |
| Tabela 17 – Metodologia de execução do ponto de amarração em cruz..... | 86 |
| Tabela 18 – Metodologia de execução do ponto de amarração simples..... | 87 |
| Tabela 19 – Montagem da armadura de sapatas em estaleiro | 88 |
| Tabela 20 – Montagem da armadura de pilares em estaleiro..... | 89 |
| Tabela 21 – Montagem da armadura de vigas em estaleiro | 90 |
| Tabela 22 – Montagem da armadura de sapatas no local de aplicação | 91 |
| Tabela 23 – Montagem da armadura de pilares no local de aplicação..... | 92 |
| Tabela 24 – Montagem da armadura de vigas no local de aplicação..... | 93 |
| Tabela 25 – Montagem da armadura de lajes no local de aplicação..... | 94 |
| Tabela 26 – Montagem da armadura de paredes no local de aplicação..... | 95 |
| Tabela 27 – Recobrimentos mínimos e nominais (E469)..... | 96 |

Simbolos, siglas e acrónimos

A - Temperatura crítica do aço

A_{c1} - Ver A

A_{gt} - Extensão total na força máxima

E_s - Módulo de elasticidade

M_f - Linha de separação das fases austenítica+perlítica com a fase perlítica e bainítica

M_s - Linha de separação das fases austenítica com a fase austenítica+perlítica

R_e - Tensão de cedência superior ou tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%

R_m - Tensão de rotura

- a - Altura máxima das nervuras
- a_1 - Perda de massa em percentagem
- c - Afastamento entre nervuras
- d - Diâmetro nominal
- $f_{0,2k}$ - Valor característico da tensão de cedência
- $f_{sy,cd}$ - Tensão de cedência à compressão de cálculo
- $f_{sy,d}$ - Tensão de cedência de cálculo
- f_t - Resistência à tração
- f_y - Tensão de cedência
- $f_{y,máx}$ - Tensão de cedência máxima real
- f_{yk} - Ver $f_{0,2k}$
- k - Valor característico de f_t/f_y
- \emptyset - Diâmetro

- γ_s - Coeficiente de segurança para capacidade resistente de cálculo
- ϵ - Extensão
- ϵ_{suk} - Valor característico da extensão na rotura
- ϵ_u - Extensão total na força máxima / rotura
- ϵ_{ud} - Extensão de cálculo na força máxima
- ϵ_{uk} - Valor característico da extensão à tensão máxima
- σ - Tensão
- σ_u - Tensão de rotura
- σ_y - Tensão de cedência

- C - Carbono
- Cr - Cromo
- Cu - Cobre
- Fe - Ferro
- Mn - Manganês
- Mo - Molibdênio
- Nb - Nióbio
- Ni - Níquel
- P - Fósforo
- S - Enxofre
- Si - Silício
- V - Vanádio
- Zr - Zircónio

1. Introdução e Objetivos

O betão armado é atualmente o material estrutural mais utilizado em todo o mundo, sendo portanto essencial conhecer em detalhe o comportamento dos seus constituintes, assim como as disposições legais em vigor para garantir que a sua execução se efetua nas melhores condições. O betão armado é uma técnica de construção que envolve materiais simples (betão e aço) que, pelas suas propriedades individuais e características como material compósito, tem permitido com sucesso, a realização de grandes edificações estruturais contemporâneas.

Esta dissertação foca a sua atenção nos aços que hoje em dia são utilizados no betão armado, concretamente no aço em varão.

A presente dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos, dos quais se fará em seguida uma breve descrição, pretendendo-se desta forma que o leitor perceba as linhas orientadoras com que aquela foi desenvolvida.

Descrevem-se as propriedades gerais do aço, sendo estudado o diagrama de fases Ferro - Carboneto de Ferro e que tipo de reações ocorre durante o arrefecimento do aço. São referidos os seus constituintes, a forma como estes se organizam em diferentes microestruturas cristalinas e de que modo estas afetam o seu comportamento mecânico.

Introduz-se a história do aço, apresentando o início desta indústria, a sua evolução e os métodos de produção atuais, as suas propriedades e modo de funcionamento. Ainda neste capítulo são apresentados os tratamentos mecânicos ou termomecânicos e os tratamentos térmicos aplicados ao aço, descrevendo o modo como são realizados e os objetivos para os quais são realizados. Na segunda parte do capítulo, é abordada a produção atual em Portugal, nomeadamente o processo Tempcore, no que consiste e qual o efeito que este tipo de tratamento tem nos varões de aço.

São listados todos os documentos legais aplicáveis a varões de aço para betão armado, procedendo-se a uma descrição detalhada dos mesmos, nomeadamente: REBAP, EN 10080, EC2, Dec. Lei 28/2007, NP EN 13670, Especificações LNEC (E449, E450, E455, E456 e E460) e os Documentos de Classificação LNEC. No fim deste capítulo são estudadas as diferenças e semelhanças entre a regulamentação existente.

É abordado o processo de aplicação em obra do varão de aço, nomeadamente os procedimentos a ter em conta com o material e o modo de armazenamento do mesmo, a metodologia de corte e dobragem dos varões e o processo de montagem e colocação de armaduras nos diversos elementos, dando um destaque especial aos espaçadores a utilizar.

Por fim, é estudado o modo como é feito o controlo da qualidade de execução dos trabalhos e que tipos de inspeções e ensaios devem ser realizados.

É feita uma síntese da visita à empresa CODIMETAL Engineering S.A., onde são descritos os procedimentos utilizados no tratamento ao aço e para que fim são realizados.

2. Propriedades gerais do aço

2.1 - Considerações gerais

Aço define-se como uma liga Ferro-Carbónica que contém Si, Mn, S e P, cujo teor em carbono pode variar entre 0,03% e 2,1%, sendo que para valores superiores obtêm-se ferro fundido.

As propriedades de uma liga Ferro-Carbónica são função da sua composição química e do processo a que a mesma foi sujeita, ou seja, da sua história térmica e mecânica. As principais propriedades mecânicas dos metais e ligas são:

- Modulo de elasticidade;
- Tensão de cedência ou tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%;
- Tensão de rotura;
- Alongamento percentual até à rotura;
- Dureza.

Na formação das ligas Ferro-Carbónicas o carbono assume uma grande importância sendo o principal responsável pela diferença de propriedades entre diferentes ligas.

Os tratamentos que são efetuados após o processo siderúrgico têm como objetivo melhorar as propriedades do aço, aumentando a resistência à corrosão e impedindo deslocamentos na estrutura cristalina. Devido à sua importância, o teor em carbono é geralmente medido em percentagem relativamente à massa total da amostra.

Uma temperatura de fusão muito importante para o comportamento dos aços é a temperatura crítica, também designada por temperatura de austenização, que varia consoante as propriedades químicas do aço. Esta temperatura representa a fase em que o aço em estado sólido tem maior capacidade de dissolver carbono, permitindo que este se distribua uniformemente antes de se iniciar qualquer processo de arrefecimento (Lourenço, 2012).

2.2 - Microestruturas no aço

As propriedades mecânicas do aço estão relacionadas com o modo de organização dos elementos, que dão origem às microestruturas. O aparecimento destas microestruturas está relacionado com a composição química do aço e com as variações de temperatura a que este é sujeito. Existem seis tipos comuns de microestrutura num aço (Gonçalves, 2006):

- Austenite (ferro γ);
- Ferrite (ferro α) e (ferro δ);
- Cementite;
- Perlite;
- Martensite;
- Bainite.

Austenite (ferro γ)

É uma solução sólida intersticial de carbono na rede cristalina do ferro (Figura 1). A solubilidade do carbono atinge um máximo de 2,11% a 1148°C e diminui para 0,77% a 727°C.

As suas características mecânicas estão dependentes do teor de carbono. Na rotura, a tensão oscila entre 880 e 1050 MPa e os alongamentos entre 20% e 23%.

A austenite é mole e dúctil, e só apresenta estabilidade no intervalo de temperaturas entre 727°C e 1500°C (conforme a percentagem de carbono em dissolução) (Gonçalves, 2006).

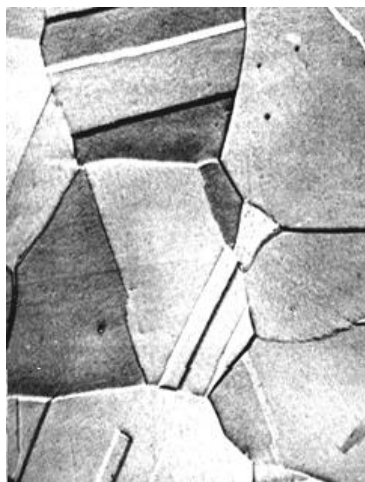


Figura 1 – Austenite (<http://www.sv.vt.edu/>)

Ferrite (ferro α) e (ferro δ)

- Ferro α :

É uma solução sólida intersticial de carbono na rede cristalina do ferro (Figura 2). A solubilidade máxima do carbono não ultrapassa 0,02% à temperatura de 727 °C, sendo praticamente nula à temperatura ambiente.

Na rotura, o valor da tensão anda na ordem de 250 MPa e o alongamento na ordem de 50%, portanto, muito dúctil e pouco resistente.

A sua presença no aço é indesejável, a menos que se pretenda obter aço extra macio (Gonçalves, 2006).

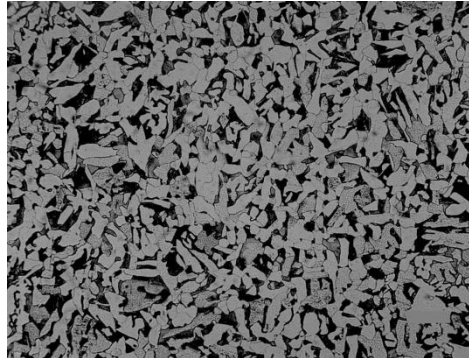


Figura 2 - Ferrite (<http://it.wikipedia.org/>)

- Ferro δ :

É uma solução sólida intersticial de carbono no ferro. Tem uma estrutura semelhante ao ferro α , formando-se somente à temperatura de 1394 °C.

Cementite (Fe₃C)

A cementite (Figura 3) tem limites de solubilidade muito pequenos e possui uma composição de 6,67% C e 93,33% Fe. Devido à elevada dureza, a cementite apresenta um comportamento muito frágil, razão pela qual as suas características mecânicas são difíceis de determinar (Gonçalves, 2006).



Figura 3 – Cementite (<http://www.ruthrumpold.id.au/>)

Perlite

Este constituinte (Figura 4) contém 0,77% de carbono e é formado por lamelas de ferrite e cementite, nas percentagens respectivas de 88% e 12%.

Quando uma amostra de aço-carbono com 0,77% C é aquecida a 750°C e mantida a essa temperatura durante algum tempo, a sua estrutura vai sofrer um processo de austenização, ou seja, transformar-se em austenite homogénea (ferro γ). Se o aço for arrefecido de forma lenta, a uma temperatura inferior à eutectóide (727 °C), verificar-se-á a transformação de toda a austenite numa estrutura lamelar de placas alternadas de ferrite e cementite, dando origem à perlite.

A forma como as lamelas se conjugam, mais precisamente o espaço existente entre elas, vai influenciar as propriedades mecânicas da microestrutura, estando a variação deste espaço associada às condições de arrefecimento. A dureza e a tensão de rotura aumentam e a extensão de rotura diminui com a redução do espaço entre as lamelas (Gonçalves, 2006).

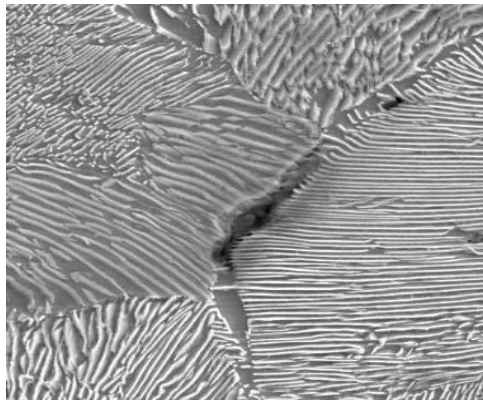


Figura 4 – Perlite (www.ebah.com.br)

Martensite

Existem dois tipos de martensite: a martensite acicular e a martensite cúbica. Ambas as formas de martensite são obtidas pelo rápido arrefecimento de austenite, não permitindo a dissipação do carbono, ficando retido na estrutura cristalina. Admite-se que a transformação da austenite em martensite ocorra sem difusão, uma vez que a transformação ocorre tão rapidamente que os átomos não têm tempo para se misturar (Gonçalves, 2006).

A martensite acicular é constituída por ferrite sobressaturada em carbono e com uma estrutura cristalina muito deformada, sendo o seu comportamento mecânico dependente da quantidade de carbono existente e da finura das lamelas de martensite.

Este tipo de martensite apresenta uma dureza bastante elevada, um alongamento reduzido e uma resiliência quase nula, o que implica uma ductilidade e uma tenacidade muito reduzidas.

A martensite cúbica exibe uma fraca distorção da rede cristalina, a ausência de austenite e a precipitação de cloretos. Relativamente à martensite acicular, a martensite cúbica oferece uma melhor ductilidade e tenacidade, mantendo ainda uma boa resistência e dureza, especialmente depois de ser submetida a um revenido para redução das tensões internas.

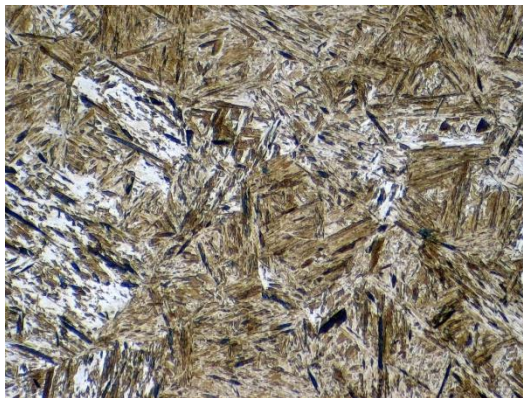


Figura 5 – Martensite (<http://metalografia.deviantart.com/>)

Bainite

A bainite é uma microestrutura cujas propriedades mecânicas estão compreendidas entre os valores da martensite e da perlite (Figura 6).

Quanto menor for a temperatura a que se forma, maior é a sua dureza, sendo a bainite inferior mais dura que a bainite superior, que por sua vez tem uma dureza superior à perlite. Com a diminuição da temperatura formam-se grãos cada vez maiores, o que origina o aumento da quantidade de carbonetos retidos (Gonçalves, 2006).

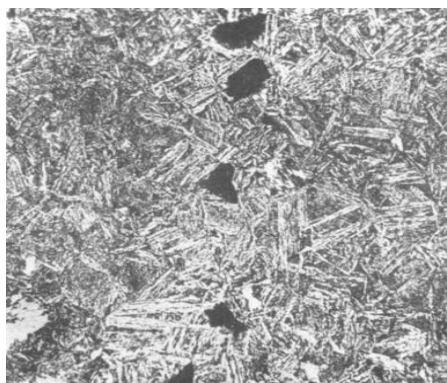


Figura 6 – Bainite (<http://products.asminternational.org/>)

2.3 - Diagrama de fases Ferro-Carboneto de Ferro

Carboneto de ferro é um composto de fórmula química Fe_3C que contém 6,67% de carbono e 93,33% de ferro.

As fases presentes após arrefecimento muito lento de ligas ferro-carbono podem ser identificadas no diagrama de fases Fe- Fe_3C (Figura 7), para diferentes temperaturas e composições até 6,67% de carbono (Gonçalves, 2006).

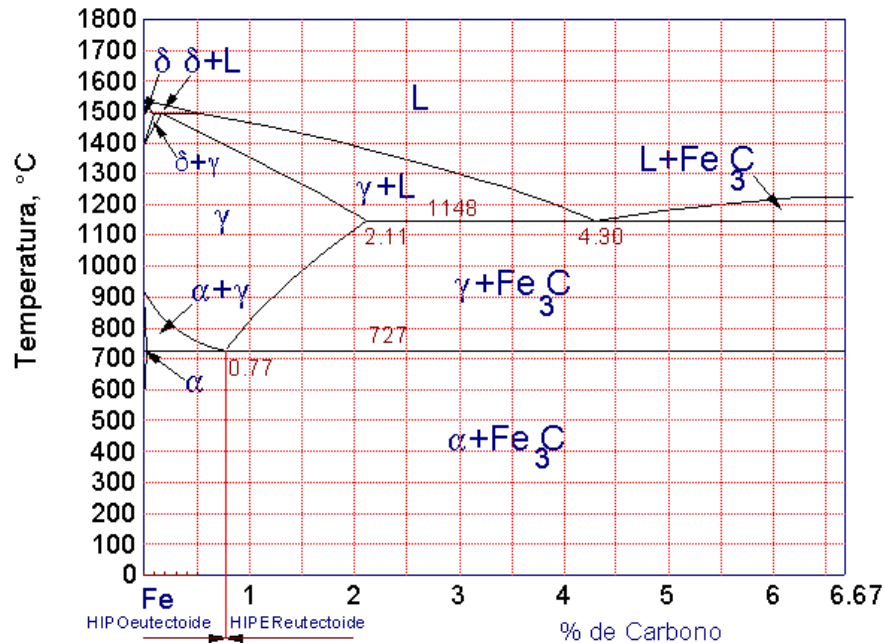


Figura 7 - Diagrama de fases Ferro – Carboneto de ferro (Gonçalves, 2006)

Legenda:

L – Estado líquido

Fe_3C – Cementite

δ – Ferrite

α – Ferrite

γ – Austenite

Dá-se relevo a dois tipos de reações-chave, que se dão a temperaturas e % de carbono distintas:

- Reação eutética:

No ponto eutético, o líquido com 4,30% C transforma-se em austenite (ferro γ) com 2,11% C e cementite (Fe_3C) com 6,67% C. Esta reação ocorre a 1148 °C no estado líquido.

- Reação eutectóide:

No ponto eutectóide, a austenite com 0,77% C origina ferrite (ferro α) com 0,02%C e cementite, com 6,67% C. A reação eutectóide dá-se a 727 °C e ocorre completamente no estado sólido, sendo importante em alguns dos tratamentos térmicos dos aços-carbono.

2.4 - Processo de desoxigenação

O aço quando se encontra em banho de fusão contém oxigénio dissolvido, elemento importante no seu fabrico. A forma como este oxigénio é libertado à medida que o metal solidifica, é fundamental em algumas das suas propriedades.

Na ausência de desoxidantes, em aços com baixo teor de carbono, a reação de carbono com oxigénio produz monóxido de carbono durante a solidificação do lingote. Este lingote tem a camada exterior isenta de cavidades e a zona interior com porosidade, devido à contração e aos gases que não foram libertados. Existem 2 classificações para os aços relativamente ao seu processo de desoxigenação: Efervescentes e calmados (Gonçalves, 2006):

- Efervescentes:

Aços efervescentes são os aços que não sofrem desoxigenação e sua superfície exterior é extremamente dúctil e praticamente isenta de carbono. Devido à sua heterogeneidade, não são apropriados para aplicações estruturais, principalmente para grandes espessuras e para aplicações onde seja necessário proceder a soldadura.

- Calmados:

Os aços que sofrem um processo de desoxigenação designam-se por calmados, podendo dividir-se ainda em 3 sub-grupos consoante o nível de desoxigenação: semi-calmados, calmados e especialmente calmados.

Os aços semi-calmados derivam de lingotes parcialmente desoxidados, podendo ser utilizados em aplicações estruturais.

Os aços calmados são completamente desoxidados pela adição de fortes agentes oxidantes como o silício e o alumínio. Têm melhor desempenho que os anteriores já descritos devido à elevada uniformidade na composição química e nas propriedades da massa do metal.

Os aços especialmente calmados são desoxidados da mesma forma que os aços calmados, diferindo apenas na quantidade de agentes oxidantes utilizados.

2.5 – Principais tipos de aços utilizados em engenharia civil

No âmbito da engenharia civil, existem vários tipos de aços desenvolvidos com o objetivo de resistir a diferentes especificações e condições de serviço, nomeadamente cargas elevadas, desgaste, impacto, corrosão atmosférica e temperaturas elevadas. Deste modo, selecionar um aço apropriado para uma determinada aplicação poderá ser uma tarefa relativamente complexa, em que diversos fatores como as geometrias e dimensões disponíveis, o custo e as propriedades requeridas terão de ser considerados. Uma forma possível para se lidar com esta complexidade associada à seleção do material, consiste em consultar bases de dados ou catálogos onde os aços disponíveis estão agrupados, formando conjuntos com determinadas aplicações-tipo. Estas bases de dados podem apresentar entre 12 a 20 grupos principais de aços (aços de construção, aços inoxidáveis, aços mola, aços ferramenta, aços rápidos, etc.), que depois se dividem em subgrupos mais específicos (Seabra *et al.*, 1981).

No caso particular da construção civil, até meados da década de 1960, à exceção da construção de pontes, praticamente foi só utilizado um tipo de aço. Este aço era normalmente classificado como aço-carbono e as normas internacionais especificavam apenas a sua tensão de cedência mínima como sendo 230 MPa. Outro tipo de aços com propriedades específicas como resistência à corrosão ou soldabilidade estavam disponíveis (ASTM A242 ou ASTM A373), mas raramente eram utilizados na construção de edifícios (Seabra *et al.*, 1981).

Hoje há uma grande variedade de aços de construção, possibilitando o aumento da resistência em determinadas peças sem aumentar excessivamente a volumetria das mesmas, aumentar a resistência à corrosão e aumentar durabilidade da estrutura. Os quatro principais grupos de aços utilizados atualmente em construção são:

- Aços carbono;
- Aços microligados;
- Aços de liga temperados e revenidos;
- Aços inoxidáveis.

Aços carbono

Segundo (Chiaverini, 2002), o ferro puro não é muito apelativo do ponto de vista das suas propriedades mecânicas, visto que é excessivamente macio, dúctil e com baixa resistência a esforços. No entanto, a adição de pequenas proporções de carbono altera radicalmente as propriedades mecânicas do ferro.

Os aços carbono normalmente aplicados em estruturas, têm teores de carbono compreendidos entre 0,15% e 0,30% e os teores de elementos de liga não ultrapassam os seguintes valores: Mn < 1,65%, Si < 0,6% e Cu < 0,6%. O aumento do teor de carbono aumenta a sua tensão de cedência, mas também reduz a tenacidade e a soldabilidade do aço.

Estes aços têm aplicações genéricas em construção de estruturas rebitadas ou soldadas, apresentando tensões de cedência até cerca de 275 MPa.

Aços microligados

Este tipo de aços, por vezes designados por aços HSLA (High Strength Low Alloy Steels) podem apresentar tensões de cedência compreendidas entre 275 e 500 MPa. Enquanto que nos aços-carbono o aumento da resistência é conseguido à custa do aumento do teor de carbono, nos aços HSLA este aumento é conseguido devido à adição de pequenas quantidades de elementos de liga tais como o Cr, Mn, Mo, Nb, Ni, V ou Zr. A adição destes elementos promove o endurecimento por solução sólida e por precipitação de finas dispersões de carbonetos levando ao refinamento da microestrutura do aço, resultando um excelente compromisso entre tensões de cedência elevadas e ductilidade. Devido à sua elevada tenacidade, estes aços apresentam em geral uma boa soldabilidade, sendo por isso adequados para construção soldada (Taylor, 2000).

Aços de liga temperados e revenidos

A têmpera do aço é um tipo de tratamento que origina um aumento da dureza e, conseqüentemente, da tensão de cedência do aço. A têmpera de aços de baixa liga pode conduzir a materiais com tensões de cedência entre 550 e 800 MPa. De modo a reduzir um pouco a fragilidade dos aços temperados após a têmpera, o aço pode ser revenido a temperaturas entre 400°C e 600°C por forma a promover alguma difusão do carbono aprisionado na estrutura martensítica reduzindo a fragilidade intrínseca a esta fase. Dada esta situação, estes aços são normalmente utilizados no estado temperado e revenido (Taylor, 2000).

Aços inoxidáveis

Existem três grandes grupos de aços inoxidáveis: os inoxidáveis martensíticos, inoxidáveis ferríticos e inoxidáveis austeníticos, sendo a sua classificação definida de acordo com a fase predominante na sua constituição à temperatura ambiente. Na construção de estruturas de engenharia civil, em particular em tubagens para fluidos agressivos, os aços inoxidáveis austeníticos são, em geral, os de utilização mais frequente, devido à elevada ductilidade e ao bom comportamento que apresentam entre resistência mecânica e resistência à corrosão. O cromo presente permite aumentar a resistência à corrosão do aço, sendo que, quando o teor de cromo é superior a 12% forma-se à superfície do aço uma fina película estável de óxido de cromo, que protege o ferro das reações com a atmosfera, em particular das reações que conduzem à formação de ferrugem, caso os produtos de aço inoxidável estejam ao ar livre (Taylor, 2000).

Nas Tabelas (1 e 2) são referidas as propriedades típicas de alguns dos aços mais utilizados em aplicações estruturais de engenharia civil. Na Tabela 1 apresentam-se os aços-carbono estruturais, os aços microligados de elevada resistência e os aços de liga temperados e revenidos, enquanto que na Tabela 2 são referidas as especificações de alguns aços inoxidáveis.

Tabela 1 - Especificações e propriedades típicas de aços comuns em construção civil (adaptado de Somayaji, 2001)

| Tipo | Teores de C e Mn | | Características mecânicas |
|---|------------------|------------|---------------------------|
| | % C | % Mn | σ_y (MPa) |
| Aço-carbono estrutural | 0.26 | - | 250 |
| Aço-carbono estrutural | 0.27 | 1.2 | 290 |
| Aço microligado de elevada resistência (à corrosão) | 0.15 | 1 | 290 - 345 |
| Aço microligado de elevada resistência | 0.21 | 1.35 | 290 |
| Aço microligado de elevada resistência (à corrosão) | 0.17 - 0.19 | 0.5 - 1.25 | 290 - 345 |
| Aço de liga temperado e revenido | 0.12 - 0.21 | 0.4 - 1.1 | 290 - 690 |

Em relação aços de construção referidos na Tabela 1, os aços ASTM A36 e ASTM A529 são aços utilizados para aplicações generalizadas sendo atualmente os mais utilizados na construção de edifícios e pontes. O aço A572 é um aço microligado com vanádio, enquanto

que os aços A242 e A588 são aços microligados com maior resistência à corrosão atmosférica. O aço A514 é um aço de liga com Cr e Mo passível de têmpera e revenido.

Tabela 2 - Aços inoxidáveis (adaptado de Somayaji, 2001)

| Tipo | Teores de C, Cr e Ni | | | Características mecânicas |
|-------------------------|----------------------|-------------|----------|---------------------------|
| | % C | % Cr | % Ni | σ_y (MPa) |
| Inoxidável martensítico | 0.08 - 0.15 | 11.5 - 13.5 | - | 290 |
| Inoxidável ferrítico | 0.08 | 16 - 18 | - | 260 |
| Inoxidável austenítico | 0.05 | 17 - 19.5 | 8 - 10.5 | 230 |

Na Tabela 2 apresentam-se características de três aços inoxidáveis, representando os grupos de aços inoxidáveis martensíticos, ferríticos e austeníticos. Como já referido anteriormente, destes três tipos, os aços inoxidáveis austeníticos são aqueles que mais se utilizam em estruturas de construção civil, principalmente em tubagens, apresentando uma elevada resistência à corrosão.

3. Levantamento dos processos industriais

3.1 - História do Aço

Há cerca de 4.500 anos, o metal ferro usado pelo homem era encontrado na natureza em meteoritos recolhidos pelas tribos nómadas nos desertos da Ásia Menor. Na Gronelândia existiam também indícios da utilização desse material. Era considerado um metal precioso devido à sua difícil obtenção.

Aos poucos, o ferro passou a ser usado com mais frequência, a partir do momento em que se passou a extraí-lo do seu minério (geralmente sob a forma de óxidos, como a magnetite e a hematite ou ainda como um carbonato, a siderite). Por volta de 1.500 a.C., no Médio Oriente, começou a exploração de jazidas. Do primeiro milénio da era cristã em diante, o ferro difundiu-se por toda bacia do Mediterrâneo.

O minério de ferro começou a ser aquecido em fornos primitivos (forno de lupa), abaixo do seu ponto de fusão, de onde resultava uma pasta designada por lupa, que era martelada para libertar as impurezas e as escórias. Após este processo a lupa era então forjada com as formas pretendidas. Este processo deve-se ao facto de algumas impurezas do minério terem menor ponto de fusão do que a esponja de ferro, e por isso, era possível retirar-lhe algumas impurezas. Para fabricar um quilo de ferro em barras, eram necessários de dois a dois quilos e meio de minério pulverizado e quatro quilos de carvão vegetal (Instituto Aço do Brasil, 2009).

O último estágio tecnológico e cultural da pré-história é a Idade do Ferro, durante a qual os utensílios de bronze foram gradualmente substituídos por utensílios de ferro. Na Europa e no Médio Oriente, a Idade do Ferro começou por volta de 1200 a.C..

Aos poucos, novas técnicas foram descobertas e desenvolvidas, tornando o ferro mais duro e resistente à corrosão. A adição de calcário à mistura de minério de ferro e carvão possibilitava melhor absorção das impurezas do minério. Novas técnicas de aquecimento também foram desenvolvidas, bem como a produção de materiais mais modernos para se trabalhar com o ferro já fundido.

No início do séc. XIV foram desenvolvidos os altos-fornos, e com a melhoria das condições de insuflação era atingida a temperatura de 1350°C. A esta temperatura é obtido pela primeira vez um metal líquido.

O ferro conseguia absorver cada vez mais carbono devido à fusão do metal, criando ferro carburado, que por sua vez funde a uma temperatura inferior, absorvendo ainda mais carbono e formando a gusa, um metal líquido, ao contrário da massa pastosa que era anteriormente obtida.

A gusa arrefecida é dura e quebradiça, sendo fácil de fundir e permitindo o seu vazamento em moldes mas não podendo ser soldada ou forjada como o ferro. Este processo era feito em aciarias, e levou a que a produção de ferro passasse de uns quilos de metal pastoso por dia para várias toneladas de gusa por mês (Robert *et al*, 1999).

No início do séc. XVIII, devido à excessiva utilização de carvão vegetal como combustível, houve grandes problemas relacionados com o abate de árvores. A solução para este problema surgiu em 1709 por Abraham Darby, conseguindo-se pela primeira vez produzir gusa utilizando coque como combustível. O coque é um combustível que se obtém do aquecimento da hulha (carvão mineral ou betuminoso), sem combustão, num recipiente fechado. Com o desenvolvimento da mecanização e da máquina a vapor, o coque passou a ser extraído em grandes quantidades evitando a utilização de carvão vegetal (Robert *et al*, 1999).



Figura 8 – Esquema de funcionamento de um alto-forno utilizando coque (www.picstopin.com)

A Revolução Industrial iniciada na Inglaterra, no final do século XVIII, tornaria a produção de ferro ainda mais importante para a humanidade. Nesse período, as comunidades agrária e rural começavam a perder força para as sociedades urbanas e mecanizadas.

É nesta altura que é desenvolvido o forno de revérbero (Figura 9). Estes fornos apresentam um desenho inovador no sentido em que o material a fundir não se encontra em contacto direto com o combustível utilizado, sendo aquecido pelo calor refletido das paredes do forno e pelos gases quentes resultantes da combustão.

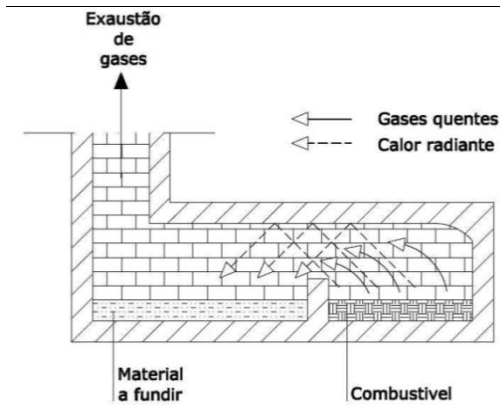


Figura 9A)



Figura 9B)

Figura 9A) – Esquema simplificado do funcionamento de um forno de revérbero

Figura 9B) – Disposição de um forno de revérbero

(<http://www.sauder.com.br>)

Simultaneamente com este novo tipo de forno é utilizada uma nova técnica designada por pudelagem, que permite finalmente a obtenção de aço.

O ferro impuro obtido era refundido no forno de revérbero sendo que, através da agitação feita por barras, a gusa ia sendo reduzida pelo oxigénio. O líquido transformava-se pouco a pouco numa massa pastosa que, no final, se tornava tão consistente que era possível retirar bolas ou "lupas", que eram a seguir marteladas em barras. O produto final apresentava uma qualidade tal que permitia a laminagem e estiragem de lingotes, obtendo produtos cada vez mais diversificados.



Figura 10 – Operário a manobrar o agitador num forno de pudelagem

No início do século XIX várias novas tecnologias foram aplicadas à produção de ferro e aço, utilizando-se máquinas a vapor para a insuflação e sopragem de ar quente, o que possibilitou um aumento da dimensão dos altos-fornos, e conseqüentemente a capacidade

de produção, que em média passou de 4 toneladas/dia para 15 toneladas/dia em cerca de 45 anos. (Robert *et al*, 1999).

3.2 - Processos industriais desenvolvidos para a obtenção de aço

Ao longo dos anos, surgiram diversos processos destinados à obtenção de aço. Neste ponto serão descritos com maior detalhe os principais processos utilizados para esse fim.

3.1.1 - Alto-forno

O alto-forno é o processo mais utilizado para obter gusa a partir do minério de ferro, apesar de ser utilizado desde o século XIV. Para melhorar a qualidade do produto obtido, o processo foi com o passar dos anos alvo de diversas inovações e alterações.

Este tipo de forno apresenta a forma e o funcionamento em tudo semelhantes às utilizadas no século XIV tendo a sua dimensão aumentado e sido adaptado de modo a tornar todo o processo automatizado e controlado.

O equipamento do alto-forno apresenta as seguintes características (Holleman, 1985):

- Altura ~30 m;
- Diâmetro interior: ~10 m (no local do anel de suporte);
- Conteúdo: 500 a 800 m³;
- Operação ininterrupta (24 horas, durante 10 anos);

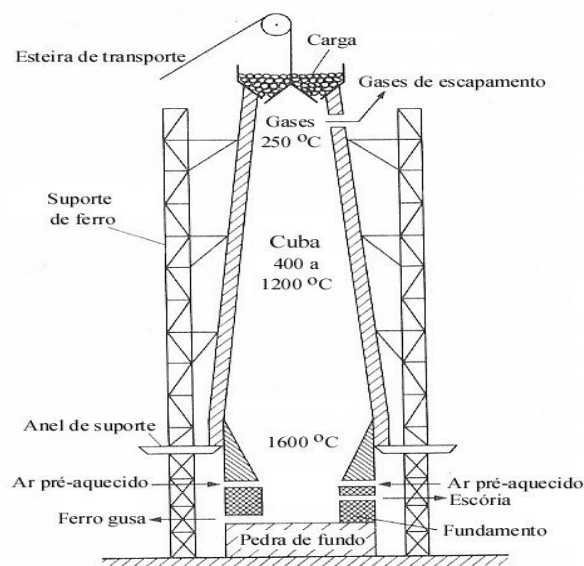


Figura 11 – Representação esquemática do alto-forno (<http://www.timoteo.cefetmg.br>)

O forno é construído de forma semelhante a uma chaminé, numa estrutura alta feita com tijolos refratários. Coque, pedra calcária e minério de ferro são inseridos no topo e o ar entra pela base permitindo a combustão no interior. Isto reduz o óxido a metal que, sendo mais denso, concentra-se na parte inferior do forno.

O alto-forno é um processo de redução carbo-térmica através do qual se produzem diversos metais a partir dos seus minérios: além do Fe, há o Manganês, Cromo, Estanho, Chumbo e Zinco. A redução do minério de ferro é um processo endotérmico em que a combustão do carvão (ou do coque) libera energia suficiente para desidratar e aquecer o minério (na parte superior da cuba) enquanto o ferro gusa derrete na parte inferior do alto-forno. O calor é excessivo, portanto até à zona mais larga do forno (altura do anel de suporte no qual assenta a cuba), tem que ser arrefecido através da circulação de água. A cuba é apenas arrefecida pelo ar pré aquecido que é injetado posteriormente pelos bicos na altura da zona de fusão (Holleman, 1985).

O carregamento do alto-forno ocorre pela extremidade superior. A carga forma normalmente camadas alternadas, coque e minério misturado com aditivos, formando cada camada com uma espessura de cerca de 50 cm.

3.2.2 - Processo de Bessemer

O processo Bessemer foi desenvolvido por William Kelly e Henry Bessemer no final do séc. XIX. Este processo permitiu a obtenção de aço de baixo carbono que se caracterizava por ser resistente mecânicamente, dúctil e tenaz. Não era no entanto endurecível por têmpera, embora pudesse ser produzido e enformado mecanicamente em grande escala de modo económico.

Era um processo onde a descarbonatação da gusa era feita num vaso em forma de pêra, caracterizado por ter uma tampa através da qual passava um tubo central de argila para soprar o ar através do metal líquido. Com esse processo foi possível conseguir, no mesmo espaço de tempo, 200 vezes mais aço que no processo de pudlagem (Cottrell, 1975).

Bessemer tentava melhorar o processo de pudlagem por intermédio da aplicação de um jacto de ar quente à gusa líquida e durante essa tentativa tirou conclusões acerca de dois aspetos: o primeiro era de que o jacto de ar eliminava de forma rápida o carbono e o silício da gusa, e o segundo era que o calor libertado na reação de oxidação das impurezas era suficiente para manter o metal em fusão, elevando a sua temperatura até à temperatura de fusão do aço (1600-1650°C).

O processo é realizado no Convertidor de Bessemer, um recipiente cuja capacidade vai de 8 a 30 toneladas de ferro fundido (Figura 12). No topo do convertidor existe uma abertura, para

injeção de ar, geralmente inclinada para o lado relativo ao corpo do recipiente, pelo qual o ferro é introduzido e o produto final removido.

O convertidor é um recipiente oval revestido por materiais refractários e com capacidade para várias toneladas de gusa líquida. No seu topo possui uma boca e no fundo tubeiras para injeção de ar, podendo ser rodado para facilitar os processos de carga/descarga (Cottrell, 1975).

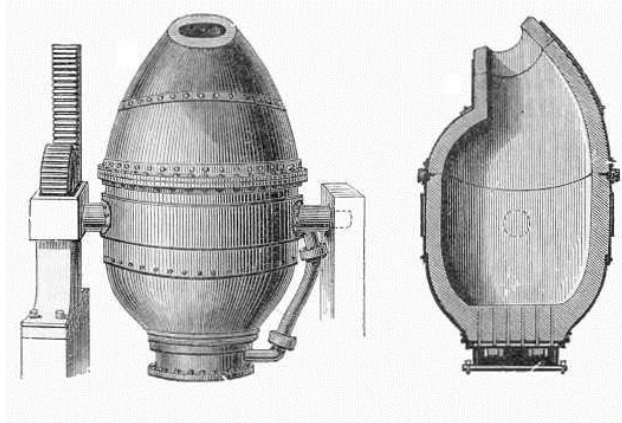


Figura 12 - Representação do convertidor de Bessemer (<http://pt.wikipedia.org/>)

O convertidor é colocado na posição horizontal de modo a ser carregado de gusa líquida e o fundo do convertidor contém perfurações, pelas quais o ar é forçado para dentro do convertidor. É rodado para receber a carga, voltando à posição normal durante a conversão e, passados alguns minutos (15 a 20), o ar é desligado rodando novamente para descarregar o aço fundido no final do processo. O processo de oxidação remove impurezas como silício, manganês e carbono, na forma de óxidos gasosos ou escórias sólidas (Cottrell, 1975).

3.2.3 - Processo de Siemens-Martin

O processo de Siemens-Martin é contemporâneo ao processo de Bessemer e foi desenvolvido com o objetivo de diminuir o consumo energético necessário à produção e encontrar um modo para transformar gusas fosforosas em aço, visto que na altura ainda não tinha sido desenvolvido o método de Thomas. A diminuição do consumo energético vem do pré-aquecimento a que o ar e o combustível (normalmente gasoso) eram sujeitos antes de entrar na câmara de combustão.

Os gases extraídos do forno aqueciam as câmaras que eram constituídas por tijolos refractários dispostos em xadrez, sendo que, a admissão/extração era feita de forma alternada nas câmaras para promover o arrefecimento das câmaras de admissão enquanto as câmaras de exaustão iam aquecendo. Deste modo, quando as câmaras de admissão

estivessem abaixo da temperatura ideal, era invertido o sentido da circulação de gases, funcionando depois como câmaras de extração.

O ferro-gusa, o calcário e o minério de ferro são colocados no forno Siemens-Martin (Figura 13) que é aquecido a aproximadamente 871 °C. O calcário e o minério formam uma escória que flutua na superfície e as impurezas, incluindo o carbono, são oxidadas e migram do ferro para a escória (Cottrell, 1975).

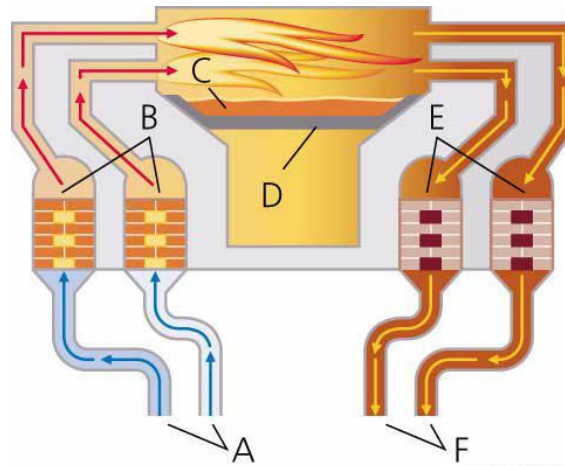


Figura 13 – Forno de Siemens-Martin (adaptada de <http://en.wikipedia.org>)

Legenda:

- A – Entrada de ar e combustível;
- B – Câmara pré-aquecida;
- C – Gusa fundida;
- D – Cadinho;
- E – Câmaras a aquecer;
- F – Exaustão de gases.

Os maiores fornos Siemens-Martin apresentam uma capacidade de aproximadamente 500 toneladas de aço por carga. A elevada capacidade de carga tem como objetivo compensar o facto de o processo ser bastante lento quando comparado com o processo de Bessemer, demorando a totalidade do processo, desde o início do carregamento até ao fim da descarga, cerca de 12 horas.

3.2.4 - Forno de arco elétrico

O forno de arco elétrico foi inventado em 1900 por Paul Héroult, tendo entrado em funcionamento em 1907 em Nova Iorque.

Este tipo de forno é também utilizado em Portugal na produção de aço, sendo o seu funcionamento baseado na indução magnética. O material a fundir é aquecido por intermédio de um arco elétrico que, por sua vez, se desenvolve entre os eléctrodos do material.

Após o fim da 2ª Guerra Mundial é que a utilização dos fornos elétricos começou a expandir. Esta expansão deveu-se ao baixo investimento inicial necessário e levou ao aparecimento de siderurgias deste tipo por toda a Europa, permitindo assim concorrer no mercado americano com os maiores produtores de aço dos Estados Unidos.

O funcionamento deste tipo de fornos tem as características ideais para a produção de aços de elevada qualidade, especialmente os aços ligados (constituídos por metais como o Níquel, o vanádio, o crómio etc...). Este facto deve-se às temperaturas atingidas por estes fornos, que são superiores às de outros e permitem a existência de elementos no forno sem que estes sejam oxidados, o que aconteceria com a maior parte dos metais nos convertidores de Bessemer e nos fornos de Siemens-Martin.

A constituição do forno de arco elétrico caracteriza-se por possuir um vaso revestido por materiais refractários arrefecido a água, com uma cobertura móvel, na qual estão inseridos eléctrodos de grafite (Figura 14).

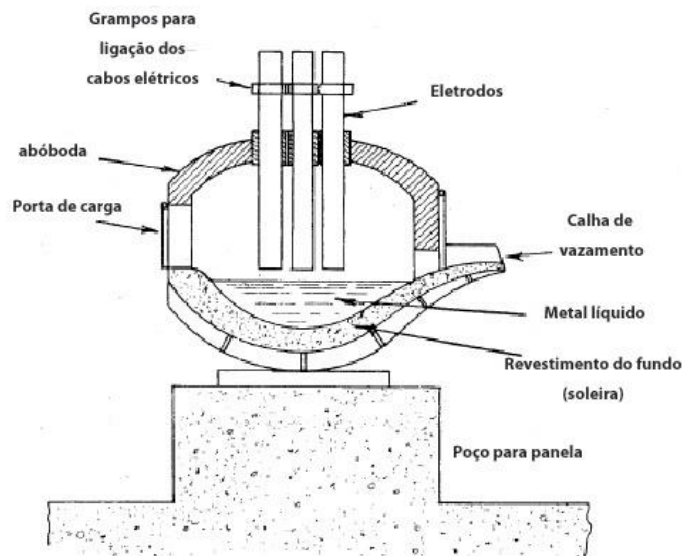


Figura 14 – Representação esquemática do forno de arco elétrico (www.ebah.com.br)

Para retirar o aço líquido, existe um orifício no fundo do forno, de modo a que o escoamento se processe minimizando a quantidade de nitrogénio e escória misturados no líquido. Este orifício encontra-se ligeiramente descentrado para reduzir as impurezas do produto final.

Este tipo de fornos apresenta uma elevada capacidade que pode chegar às 400 toneladas, sendo que, por este motivo, a operação requer grandes quantidades de energia, sendo necessários aproximadamente 440KWh por cada tonelada de aço produzido. Esta situação cria a necessidade de se ter uma rede elétrica bem desenvolvida e com grande capacidade.

3.2.5 - Processo de Linz-Donawitz

O Processo de Linz-Donawitz foi industrializado em 1952 na Áustria e caracteriza-se pela produção de aço por afinação da gusa líquida através de um jato de oxigénio puro.

Este processo consiste na utilização de um convertidor de material refratário, com a boca virada para cima, por onde entra uma lança refrigerada com água que injeta oxigénio puro a uma pressão de 4 a 12 bar sobre o banho metálico (Figura 15). A carga do convertidor é constituída por ferro gusa líquido, sucata de ferro, minério de ferro e aditivos.

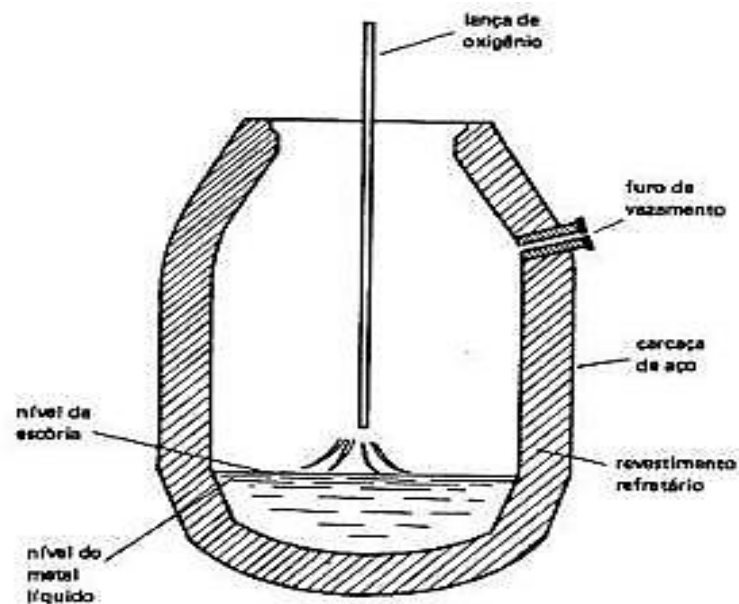


Figura 15 – Representação esquemática do forno Linz-Donawitz (<http://www.ebah.com.br>)

Para oxidar o carbono presente no metal líquido que é colocado no convertidor Linz-Donawitz é necessária uma grande quantidade de energia pois a reação consome elevadas quantidades de calor. Para compensar esta situação, um dos principais elementos presentes no ferro gusa é o silício, que também é oxidado, formando uma reação exotérmica ($\text{Si} + \text{O}_2 = \text{SiO}_2$). Para diminuir a temperatura, adiciona-se ainda sucata ou minério de ferro. Para aumentar a qualidade do aço, adicionam-se ainda os elementos de liga no final do processo.

O processo foi inicialmente pensado e concebido para o tratamento de gusas de baixo teor em fósforo, apresentando bons resultados para tal, no entanto, no caso de gusas com elevado teor em fósforo, o processo revelava-se ineficaz.

O problema das gusas com elevado teor em fósforo foi mais tarde resolvido devido à injeção de cal em pó juntamente com o jato de oxigénio, uma vez que, era necessário eliminar uma maior quantidade de fósforo de modo a que se atingisse o teor em carbono pretendido. A cal interferia nas reações de oxidação, dando origem a uma escória fortemente desfosforante desde o início da sopragem.

Este convertidor oferece vantagens económicas sobre os convertidores do processo de Bessemer e Siemens Martin.

3.2.6 - Processos de Kaldo e Rotor

O processo de Kaldo e o processo de Rotor são dois processos muito parecidos relativamente à forma como se obtém escória. Ambos se assemelham ao processo de Siemens-Martin, baseando-se na ação refinadora escória-metal, sendo que a diferença reside no facto de que em Siemens-Martins a criação de escória dependia da introdução de óxido de ferro, enquanto que nestes novos processos obtêm-na a partir da sopragem de oxigénio sobre o metal, mais concretamente a superfície do metal no processo de Kaldo e tanto a superfície como o interior do metal no processo de Rotor.

Estes processos são vantajosos no que diz respeito à rapidez de execução, uma vez que o processo demora cerca de 35 minutos por carga, e à economia devido ao facto de não ser necessária a utilização de fontes de calor externas porque há poucas perdas de calor. Devido a esta situação, conseguem-se atingir elevadas temperaturas o que permite a inclusão de sucata de aço misturada com a gusa.

3.3 - Tipo de tratamento dos aços em varão

Os tratamentos aplicados ao aço têm o objetivo de o transformar e de conferir as características necessárias à sua aplicação em elementos de betão armado. Os tratamentos podem ser mecânicos (e termomecânicos) ou térmicos.

Segundo Filho, 2004, de uma forma geral, a aplicação de um tratamento térmico ou mecânico a um aço para melhoria de determinadas propriedades é conseguida com prejuízo de outras. Por exemplo, o aumento da dureza ou da resistência à tração tem como consequência a redução da ductilidade.

3.3.1 - Tratamentos mecânicos (a frio) e termomecânicos

De forma a conferir melhores propriedades mecânicas e a conferir a forma desejada aos elementos, surgiram diversos tratamentos mecânicos e termomecânicos.

3.3.1.1 - Laminagem

A laminagem consiste em modificar a secção transversal de um metal na forma de barra, lingote, placa ou fio, pela passagem entre dois rolos. O processo consiste em fazer as peças atravessar uma máquina onde lhes é aplicada uma força transversal que comprime a peça (Figura 16).

O processo pode ser realizado continuamente ou em etapas e podem ser utilizados um ou mais cilindros de laminação, possibilitando a obtenção das dimensões dos produtos semi-acabados ou da peça pronta.

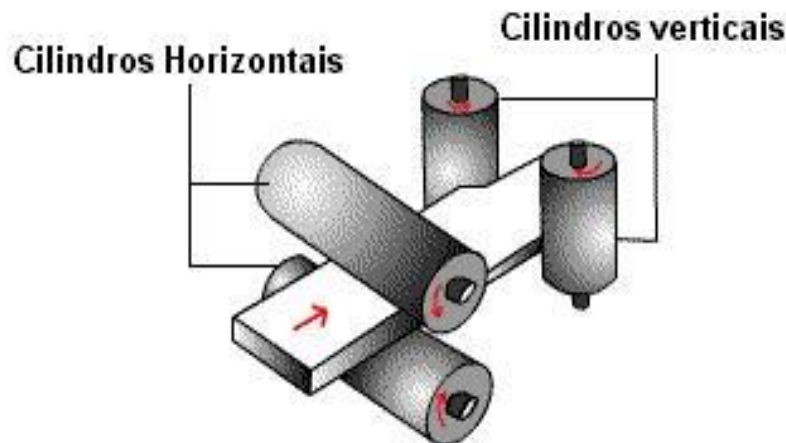


Figura 16 – Representação esquemática da posição dos rolos (<http://www.abal.org.br/>)

Com cada passagem nas estações de laminagem, o diâmetro do elemento é reduzido e o seu comprimento aumenta. Este aumento de comprimento tem como consequência o aumento da velocidade a que o aço atravessa as estações de laminagem. A velocidade excessiva torna mais difícil controlar o processo, na medida em que, é mais difícil fazer uma monitorização adequada e efetuar qualquer correção em tempo útil.

O processo de laminagem pode ser aplicado a frio ou com aquecimento prévio. No caso de ser aplicado com aquecimento prévio é possível utilizar forças mais reduzidas uma vez que a peça está plástica (ao rubro), tornando o processo mais eficiente e contribuindo para que a peça final tenha tensões internas mais baixas relativamente ao processo feito à temperatura ambiente. A temperatura ao longo da linha de produção é mantida pelo aquecimento que o aço sofre aquando da redução de secção, podendo também ser aquecida ou arrefecida em

determinados pontos da linha caso seja necessário, de modo a permitir que o aço chegue ao fim desta com a temperatura ideal (Filho, 2004).

Características da Laminagem a quente:

- Utilizada para materiais que tenham baixa plasticidade a frio;
- Permite grandes reduções de espessura;
- Forças de laminagem menores que as de laminagem a frio;
- O acabamento superficial é pobre;
- Resulta em tolerâncias dimensionais largas.

Características da Laminagem a frio:

- Utilizada para materiais com boa plasticidade;
- As reduções de espessura são limitadas pelo encruamento;
- Forças de laminagem muito maiores que as de laminagem a quente;
- O acabamento superficial é muito bom;
- Resulta em tolerâncias dimensionais mais estreitas que a laminagem a quente.

3.3.1.2 - Estiramento

O estiramento consiste na aplicação de uma força de tração a um elemento, causando assim o aumento do seu comprimento e a diminuição da sua secção, sendo que, quanto mais dúctil for o material, maiores serão as deformações possíveis. Neste processo, o gradiente de tensões é pequeno, o que garante a quase total eliminação da recuperação da forma inicial.

Este processo permite aumentar a resistência mecânica à tração, no entanto, o comportamento mecânico é bastante heterogéneo ao longo da peça devido ao facto de que a secção e o alongamento obtidos não serem constantes.

3.3.1.3 - Trefilagem

A trefilagem é um processo que apresenta parecenças tanto com a laminagem como com o estiramento. A matéria-prima é forçada a passar através de uma fieira (designação habitualmente dada às matrizes de trefilagem), sofrendo deformação plástica e sendo à saída aplicada uma força de tração. Este processo dá origem a um produto com menor secção transversal, maior comprimento, maior qualidade superficial e maior resistência mecânica.

As fieiras de trefilagem são constituídas por aço ferramenta, um tipo de aço que se caracteriza pela elevada dureza e resistência à abrasão, tem boa tenacidade e mantém as propriedades de resistência mecânica mesmo sob elevadas temperaturas. São constituídas por quatro zonas distintas:

- Zona de entrada – De modo a facilitar a lubrificação do processo, esta zona possui um ângulo um pouco maior que o ângulo de trefilagem;
- Zona de trefilagem – Possui um ângulo que normalmente está entre 5° e 15°;
- Zona cilíndrica – Por razões de fabrico e manutenção da matriz é incluída de modo a garantir uma boa estabilidade dimensional ao produto final;
- Zona de saída – Possui um ângulo de abertura contrário aos ângulos de entrada e trefilagem.

Tal como a estiragem, este tratamento é principalmente utilizado para obter barras e fios, mas neste caso, o produto final apresenta uma secção e um alongamento mais constantes, tornando os produtos mais homogêneos em termos de comportamento mecânico.

Devido ao maior controlo da qualidade do produto final, é possível a utilização deste processo na produção de elementos estruturais, tais como as armaduras de pré-esforço.

3.3.2 - Tratamentos térmicos

Este tipo de tratamentos tem como objetivo o melhoramento das características mecânicas dos aços por variação controlada de temperatura. Existem quatro tipos de tratamentos térmicos: o recozimento, a normalização, a têmpera e o revenido.

3.3.2.1 - Recozimento

O recozimento consiste no aquecimento uniforme do aço-carbono, estando a peça exposta a uma certa temperatura durante um intervalo de tempo, seguindo-se o arrefecimento lento no interior de um forno até atingir a temperatura ambiente.

O recozimento tem como objetivo repor no material as características que haviam sido alteradas por tratamentos térmicos ou mecânicos aplicados numa fase anterior, regularizar estruturas brutas resultantes da fusão transformando-as em estruturas mais favoráveis à maquinagem ou à deformação a frio, atenuar heterogeneidades e reduzir tensões internas criadas aquando da formação do elemento (Filho, 2004).

De modo a que algumas zonas da peça não cheguem a temperaturas consideravelmente superiores à restante peça, o aquecimento deve ser efetuado o mais uniformemente possível, de modo a evitar o possível empenamento da peça. O intervalo de tempo a que a

peça fica exposta durante o aquecimento assume também grande importância, variando com o tipo de metal e com a forma/dimensões da peça, devendo ser suficiente para que ocorra a transformação de toda a estrutura inicial.

A peça deve ser arrefecida no forno ou imersa em cal em pó de modo a ter um arrefecimento lento. Este arrefecimento lento possibilita uma transformação total e gradual na estrutura final do elemento, sendo que, quanto maior for o teor em carbono do aço, mais lento terá de ser o arrefecimento. O ritmo de arrefecimento pode no entanto ser aumentado a partir do momento em que se considera que a transformação está completa (Seabra, 2002).

Existem diversos tipos de recozimento, caracterizando-se pelo objetivo com o qual são feitos. Os tipos de recozimento existentes são os seguintes:

- Recozimento completo:

Pode também ser designado como recozimento de homogeneização ou recozimento de difusão e tem como objetivo melhorar as propriedades das peças por uma distribuição mais uniforme dos elementos químicos e dos constituintes estruturais. O fabrico de peças por vazamento leva a que esta distribuição não seja uniforme devido à segregação de alguns constituintes causada pela força da gravidade.

- Recozimento isotérmico:

O processo é semelhante ao recozimento completo, diferenciando-se pelo arrefecimento. Este deve ser efectuado a uma velocidade superior, mergulhando a peça num banho de sais. Este processo permite que o tratamento seja efetuado com maior rapidez, permitindo ainda uma microestrutura mais bem definida devido ao melhor controlo sobre a distância interlamelar da perlite.

- Recozimento de amaciamento:

Tem como objetivo conferir ao aço uma estrutura que corresponde à sua dureza mínima. O material obtido apresenta maior aptidão para aplicações que exijam deformação, como a estampagem, laminagem a frio, dobragem, etc.

- Recozimento de regeneração:

Pode também ser designado como recozimento de afinação do grão e caracteriza-se pelas diferentes velocidades de arrefecimento da peça, que permitem, obter um aço com a finura e regularidade pretendidas, sendo que quanto mais rapidamente se processar o aquecimento e o arrefecimento mais fino será o grão.

- Reozimentos subcríticos:

Existe um grupo de reozimentos designados por subcríticos, em que a temperatura a que é feito o aquecimento é inferior à temperatura crítica e sendo o arrefecimento feito a diferentes velocidades tal como no reozimento de regeneração.

Estes tratamentos são considerados reozimentos apesar de não ser atingida a temperatura crítica, uma vez que a estrutura do produto final é sempre mais estável do que antes do tratamento. Estes reozimentos subcríticos têm como objectivo a redução das tensões internas, recristalização da estrutura de grãos e restauração das propriedades mecânicas.

3.3.2.2 - Têmpera

O objetivo da têmpera está relacionado com a obtenção de uma microestrutura essencialmente bainítica ou martensítica proporcionando ao aço propriedades elevadas de dureza e resistência mecânica. O processo consiste no aquecimento até à temperatura de austenitização, ou seja, entre 815 °C e 870 °C.

O aquecimento deve ser lento no início, para não provocar defeitos no metal e a forma como é mantida a temperatura varia de acordo com a forma da peça, devendo o tempo ser bem controlado. Em seguida, o aço é submetido a um arrefecimento brusco, obtendo-se assim uma estrutura martensítica. Este arrefecimento é geralmente efectuado por contacto da peça com um líquido, podendo em certos casos obter-se resultados semelhantes através de um simples arrefecimento ao ar. A velocidade de arrefecimento é um factor determinante neste tratamento, dependendo esta de três elementos distintos que são: a transmissão de calor no sólido, a transferência de calor na interface e a transmissão de calor no fluido.

A eficácia do tratamento depende da peça a tratar (condutibilidade térmica, calor específico, forma e dimensões) e do fluido utilizado (temperatura do fluido, temperatura de ebulição, calor latente de vaporização, calor específico, tensão superficial e reactividade química).

Os fluidos mais utilizados são a água, o óleo, banhos de metais ou de sais fundidos, sendo que, são ainda utilizados leitos fluidificados, que consistem num leito de sólidos finamente divididos através dos quais se passa um gás ou um líquido, suspendendo os sólidos e conferindo-lhe características de um líquido (Ciaverini, 2002).



Figura 17 – Exemplo do modo de arrefecimento de uma peça (<http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/>)

O processo provoca algumas deficiências no aço, como a redução da ductilidade e da tenacidade, além de tensões internas que podem provocar deformações, empenamento e fissuração. Por conta disso, é recomendável que o aço temperado seja submetido ao revenimento.

Os tipos mais recorrentes de têmpera são os seguintes:

- Têmpera isotérmica:

Este tipo de têmpera possibilita a obtenção de peças endurecidas com um mínimo de tensões residuais ou deformações, sendo ainda melhorada a tenacidade. No entanto, o endurecimento obtido é inferior ao obtido através de uma têmpera clássica (martensítica).

Neste processo, a peça é aquecida e mantida a uma determinada temperatura durante um período de tempo, de modo a permitir a formação de uma estrutura austenítica, sendo posteriormente arrefecida bruscamente num banho de sais. Depois deste arrefecimento inicial, quando a peça se encontrar à temperatura desejada, o arrefecimento continua em óleo ou ao ar até à temperatura ambiente.

- Têmpera martensítica:

A têmpera martensítica, como o nome indica, tem como objectivo a obtenção de uma estrutura martensítica para a peça, de modo a conferir-lhe a maior dureza possível. O aquecimento e o tempo de exposição a temperaturas elevadas é semelhante à têmpera isotérmica mas o arrefecimento processa-se de forma mais rápida, como se pode verificar na Figura 18.

- Têmpera por etapas:

A têmpera por etapas, também conhecida por martêmpera, apresenta-se como um método de obter materiais com características entre os dois outros tipos de têmpera acima representados, sendo que, o arrefecimento processa-se de forma mais lenta que o da têmpera martensítica, mas mais rapidamente que o da têmpera isotérmica. Este processo possui, tal como a têmpera isotérmica, um patamar em que a temperatura fica estável, sendo esta temperatura ligeiramente superior ao troço inicial da linha Ms (Figura 18) ainda na fase austenítica do aço.

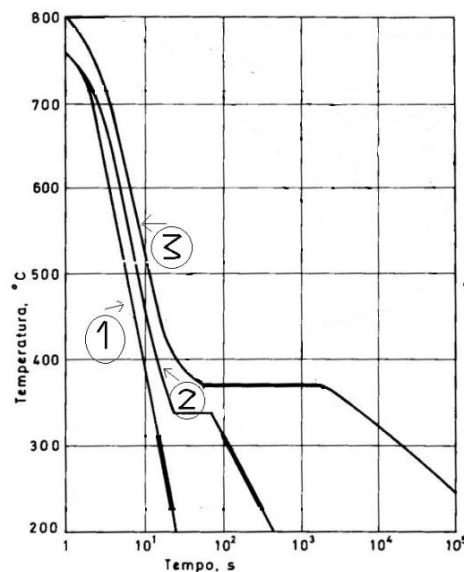


Figura 18 - Diagramas de arrefecimento para vários tipos de têmpera (adaptado de Seabra, 2002)

Legenda:

1. Têmpera martensítica;
2. Têmpera por etapas;
3. Têmpera isotérmica.

3.3.2.3 - Normalização

A normalização apresenta semelhanças com o recozimento, diferenciando-se pelo facto de a temperatura a que a peça é submetida ser superior e o arrefecimento ser feito ao ar, acontecendo mais rapidamente.

Devido ao arrefecimento mais rápido a que a peça é sujeita, o produto final apresenta uma estrutura mais fina relativamente à obtida por recozimento. Em alguns aços, o arrefecimento rápido pode conduzir ao aparecimento de uma estrutura de têmpera.

Segundo (Gonçalves, 2006), os objetivos da normalização são os seguintes:

- Refinar o tamanho do grão;
- Aumentar a resistência mecânica do aço relativamente à resistência do aço recozido;
- Reduzir segregações de composição resultantes de vazamento ou forjamento de forma a obter uma estrutura mais uniforme;

3.3.2.4 - Revenido

O revenido surge sempre depois de uma têmpera, consistindo um reaquecimento da peça, embora a temperaturas bastante inferiores às utilizadas nos restantes tratamentos. Este tratamento tem como objetivo eliminar ou reduzir os efeitos negativos resultantes da têmpera, aliviando as tensões internas e corrigindo durezas excessivas que podem resultar em fragilidade no elemento, de modo a melhorar a ductilidade e a resistência ao choque.

Quanto mais elevada for a temperatura e maior for a duração deste tratamento, menores serão as propriedades obtidas pela têmpera, principalmente a dureza e a rigidez, tornando o material mais dúctil e com menos resistência. Assim sendo, a temperatura normalmente utilizada encontra-se entre os 150°C e os 600°C, sendo que a duração do processo varia entre 1h e 3h (Seabra, 2002).

3.4 - Produção Atual

Atualmente o aço é produzido através de dois processos básicos – a partir de matérias-primas (minério de ferro, calcário e coque) em alto-forno ou a partir de sucata em forno de arco elétrico (por reciclagem). Cerca de 60% do aço produzido atualmente é feito pelo primeiro processo, também conhecido por processo integrado. A produção do aço em alto-forno utiliza entre 25% a 35% de aço reciclado enquanto que na produção do aço em forno de arco elétrico essa percentagem é aproximadamente de 95%.

Os principais minérios de onde é feita a extração do ferro encontram-se em grandes jazigos de superfície ricos em ferro, sendo que, aqueles que têm maior qualidade não necessitam de nenhum tratamento antes de serem submetidos à função redutora. A redução do óxido de ferro (FeO) é relativamente simples, sendo possível utilizar temperaturas a partir dos 750°C para ser feita a redução com o carbono (C).

Fatores como a abundância, o baixo custo de produção e a resistência do material, fazem com que o ferro e o aço sejam o material metálico mais produzido e utilizado no campo da engenharia.

3.4.1 - Impacto Ambiental

A indústria siderúrgica é uma indústria que consome bastante energia e materiais. Mais de metade da grande quantidade de materiais e energia que entra no processo resulta na produção de efluentes gasosos e de resíduos sólidos/subprodutos.

A energia consumida na produção em alto-forno é aproximadamente 27 GJ por tonelada de aço, enquanto que na produção em forno de arco elétrico esse consumo é de cerca de 8 GJ (Figura 19) (Oliveira, 2014).

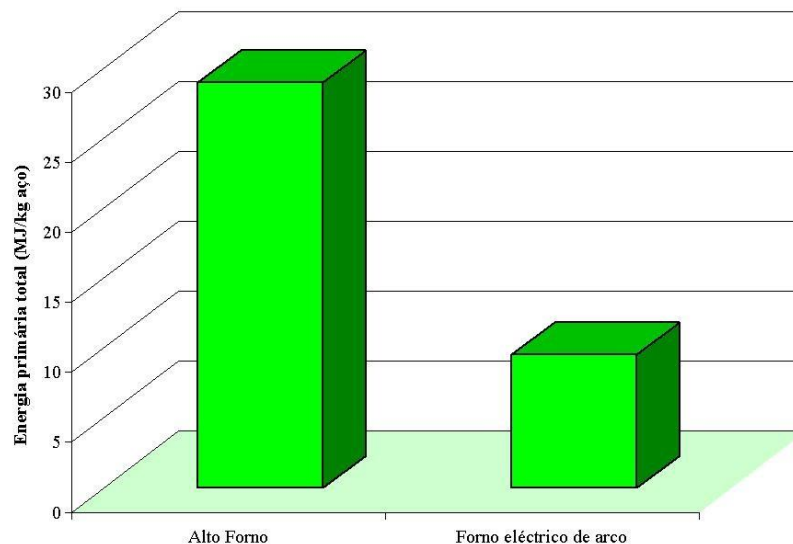


Figura 19 – Energia consumida por processo (<http://www.cool-haven.com/>)

Em termos ambientais, o forno de arco elétrico é um processo mais eficiente devido às menores emissões de carbono e de outras partículas.

O processo de reciclagem requer menos energia, cria menos resíduos e provoca a emissão de menores quantidades de partículas poluentes do que a produção da mesma quantidade de aço a partir de matérias-primas. Em cada tonelada de aço reciclado são poupados aproximadamente 1.25 tonelada de minério de ferro, 630 kg de carvão e 54 kg de calcário.

O CO₂ e outros gases estufa são as partículas poluentes que mais se destacam, sendo que, 1kg de aço em forno de arco elétrico produz cerca de 462 g de equivalentes de CO₂, enquanto que em alto forno a produção de igual quantidade de aço produz cerca de 2494 gr de equivalentes de CO₂.

No gráfico da (Figura 20) são apresentados alguns dos principais impactes ambientais provocados pela produção de uma tonelada de aço. Neste gráfico é possível comparar, em termos percentuais, os impactos ambientais gerados por cada um dos processos (Oliveira, 2014).

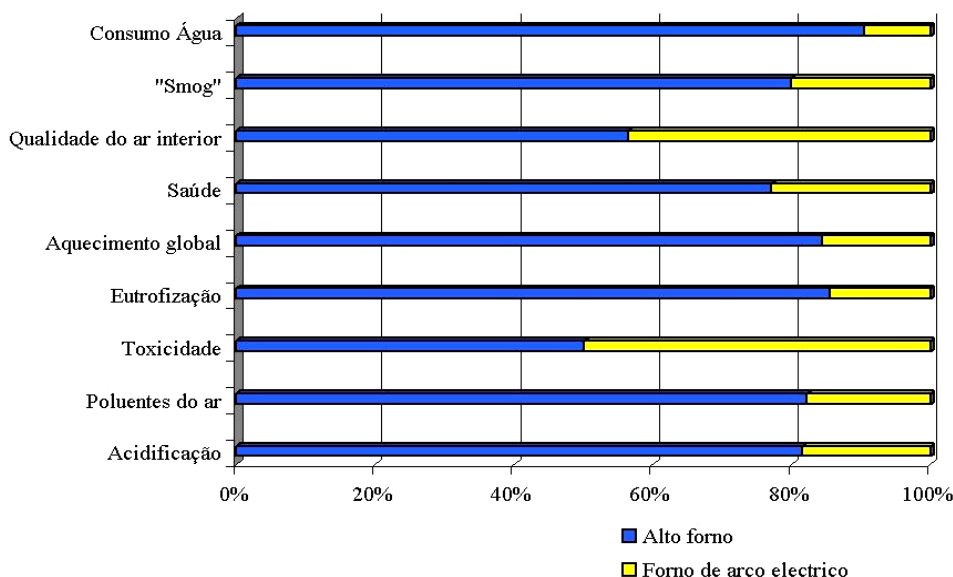


Figura 20 – Impactes ambientais por processo (<http://www.cool-haven.com/>)

Após observar o gráfico, facilmente se verifica que o forno de arco eléctrico apresenta melhor desempenho ambiental relativamente ao alto-forno.

3.4.2 – Produção de aço em Portugal

A produção de aço em Portugal é feita somente a partir da reciclagem de sucata devido à inexistência de minério de ferro e de indústria de extração mineira em Portugal. A reciclagem de sucata permite a obtenção de aço de uma forma menos poluente e com mais baixo custo energético.

O aço com a designação Tempcore é o aço atualmente utilizado para a produção de varões de aço em Portugal, resultante de um método de produção semelhante à produção do aço natural que era produzido anteriormente, somente com uma pequena diferença que ocorre no final da laminagem, a qual consiste na aplicação de uma têmpera e um revenido parcial submetendo os varões que se encontram ao rubro a um arrefecimento com jatos de água sob pressão (Lourenço, 2012).

Na primeira fase deste tratamento, a zona exterior do varão transforma-se em martensite devido à rápida redução da temperatura enquanto que o interior preserva a elevada temperatura estando num estado austenítico.

Na segunda fase, é feito um novo aquecimento da zona exterior do varão devido à temperatura do núcleo, revenindo a martensite, aumentando assim a sua ductilidade.

Na última fase o varão arrefece gradualmente até à temperatura ambiente.

Através das variações de temperatura durante o processo, surge uma estrutura de transição entre a martensite da superfície e a perlite do núcleo chamada bainite. A estrutura obtida contém propriedades mecânicas entre a martensite e a bainite o que possibilita uma transição gradual entre elas (Lourenço, 2012).

Com o aparecimento desta técnica de produção de aços, cujos custos eram semelhantes ao custo dos varões de aço “normal”, deixou de ser economicamente viável comprar varões de aço macio para realizar o seu endurecimento, pois o custo deste tratamento é superior à diferença de preço entre o varão macio e o aço Tempcore (Lourenço, 2012).

De modo a observar a profundidade até à qual o tratamento é efetuado, a secção de um varão de aço Tempcore é pulida com alumida de 1 μm e tratada quimicamente com nital 2% (Filho, 2004). Este procedimento permite visualizar o contraste entre as diferentes estruturas cristalinas, como se pode verificar na Figura 21.



Figura 21 – Corte de um varão com as zonas constituídas por diferentes estruturas cristalinas identificáveis devido a tratamento químico aplicado e a sua ampliação (Filho, 2004)

Analisando a Figura 21 pode-se observar que a camada superficial do varão é constituída por martensite revenida, conferindo-lhe assim maior resistência relativamente à apresentada antes do tratamento.

Antes do surgimento deste processo existiam dois métodos para obter varões de alta resistência. Um deles, o menos comum, baseava-se na adição de elementos de liga

bastante raros e de difícil extração, tornando este tipo de varões muito mais dispendioso. No segundo método, eram aplicados tratamentos mecânicos aos varões “normais”. Este segundo método era menos dispendioso que a adição de elementos ao aço, tendo-se criado uma indústria que comprava o aço à Siderurgia Nacional e aumentava a resistência submetendo-o a tratamentos mecânicos, dos quais a torção e a trefilagem eram os mais comuns (Lourenço, 2012).

Na Figura 22 apresenta-se a dureza ao longo do perfil de um varão Tempcore com 22mm de diâmetro.

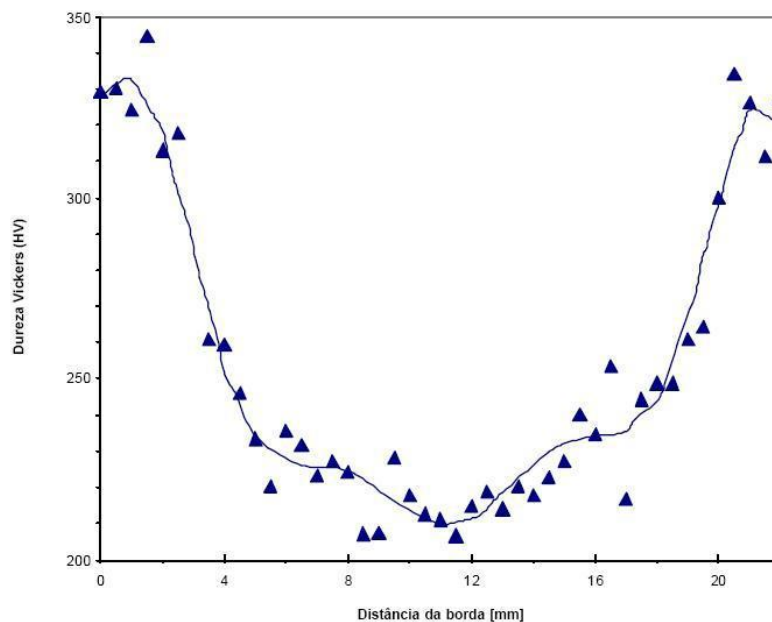


Figura 22 – Perfil de dureza para varão de 22mm de diâmetro (Rodrigues *et al*, 1992)

A introdução deste tipo de varão em Portugal em 1989 provocou o desaparecimento dos varões endurecidos a frio por torção. Este facto deve-se à semelhança de custos entre a produção destes aços de alta resistência e a produção de aço “normal”. Em termos económicos, deixou de ser viável comprar varões de aço macio para efetuar o seu endurecimento por torção, uma vez que os custos inerentes a este tipo de tratamento são superiores à diferença do custo entre os varões macios e varões produzidos pelo processo Tempcore (Lourenço, 2012).

Esta tendência foi seguida em todo o Mundo, podendo-se verificar na Figura 23 o crescimento que a produção deste tipo de varões teve no final do anos 70 e início dos anos 80.

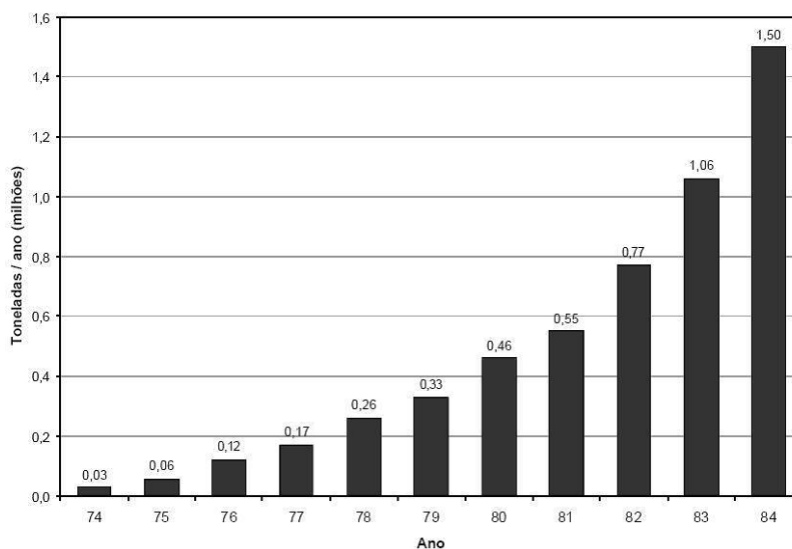


Figura 23 – Evolução da produção de varões (em milhões de toneladas/ano) utilizando o processo Tempcore (Simon *et al*, 1984)

3.5 - Dados estatísticos acerca da indústria do aço

A produção mundial de aço no primeiro semestre de 2014 aumentou 3,9% em relação ao mesmo período de 2013. De toda a produção mundial de aço, a China é responsável por 50%, tendo produzido até Junho de 2014 cerca de 412 milhões das 821 milhões de toneladas de aço produzidos a nível mundial.

No ano de 2011, os 65 principais países produtores de aço registaram um recorde de 1490 milhões de toneladas, mais 6% que em 2010. No ano seguinte, a produção voltou a aumentar para 1510 milhões de toneladas, mais 1.4% comparativamente com 2011.

Em Dezembro de 2013 já se haviam fabricado 1578 milhões de toneladas de aço nesse ano, confirmando a tendência de crescimento da produção verificada nos últimos anos (INE, 2014).

Na Figura 24 está representada a produção mundial de aço no 1º semestre de 2014.

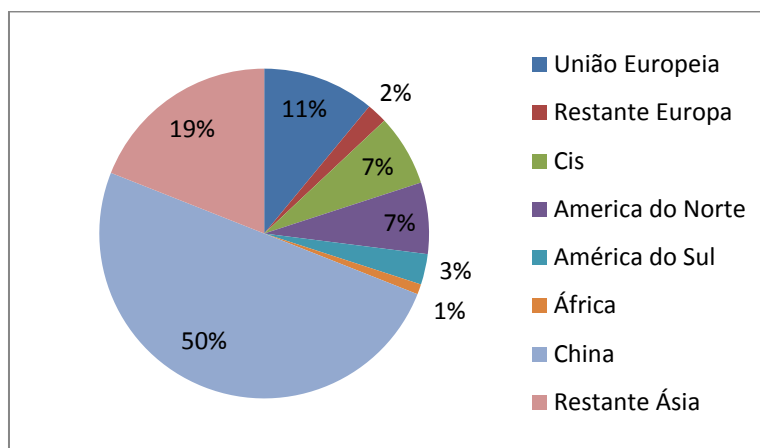


Figura 24 - Produção mundial de aço no 1º Semestre de 2014 (WORLDSTEEL, 2014)

O sector siderúrgico Europeu é fortemente concentrado. Os cinco Estados- Membros (EM) maiores produtores de aço da U.E. detêm, em 2014, uma quota acumulada de cerca de 66% do mercado da U.E.. Estes EM são, em ordem decrescente, da sua quota, a Alemanha (cerca de 26%), Itália (cerca de 15%), França (cerca de 9,5%), Espanha (cerca de 8,5%) e Reino Unido (cerca de 7%) (INE, 2014).

Na Tabela 3 pode-se verificar que a China é atualmente o líder dos países exportadores de aço. Em sentido inverso, observa-se que os Estados Unidos seguidos dos países pertencentes à União Europeia são os que mais importaram aço no período homólogo.

Tabela 3 - Os principais mercados de aço em 2013 (ISSB, 2014)

| País | Exportação (milhões de toneladas) | Importação (milhões de toneladas) | Diferença |
|----------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------|
| China | 57.1 | 14.4 | 42.7 |
| Japão | 42.1 | 13.9 | 28.2 |
| Coreia do Sul | 28.1 | 18.5 | 9.6 |
| Turquia | 17.0 | 14.3 | 2.7 |
| União Europeia | 35.2 | 26.9 | 8.3 |
| E.U.A. | 11.8 | 28.6 | -16.8 |
| Taiwan | 11.3 | 7.6 | 3.7 |
| Ucrânia | 24.6 | 7.5 | 17.1 |
| Índia | 9.3 | 7.4 | 1.9 |
| Tailândia | 5.4 | 15.6 | -10.2 |
| Indonésia | 8.2 | 12.0 | -3.8 |
| Canadá | 8.1 | 8.5 | -0.4 |

O continente Asiático, pela sua dimensão e potencial como consumidor e produtor de aço, tem cada vez mais influência nas oscilações imprevisíveis dos preços e na maior ou menor

escassez dos produtos siderúrgicos. Esta situação deve ser avaliada de forma sistemática para que se possa afinar a previsão da evolução dos mercados (Chagas, 2009).

Atualmente, as previsões de consumo são bastante pessimistas, uma vez que, o consumo mundial de aço não tem capacidade para absorver toda a produção instalada.

Por sua vez, nos E.U.A., o preço médio do aço em varão também tem sofrido flutuações constantes, baseadas principalmente nas operações dos fornecedores e na força do mercado da indústria da construção em geral. Recentemente, o preço do aço em varão tem vindo a decrescer de forma acentuada, o que já obrigou muitos dos fornecedores de aço em varão a fazerem as suas encomendas de abastecimento de matéria-prima em espaços de tempo mais reduzidos, mensalmente por exemplo. O mercado está tão volátil que os preços chegam a registar mudanças horárias (Rebarpricing, 2014).

Em Portugal, a produção de aço em bruto desde 2009 até ao 2013, de acordo com a Confederação Europeia das Indústrias do Ferro e do Aço (Eurofer, 2014), está representada na Figura 25.

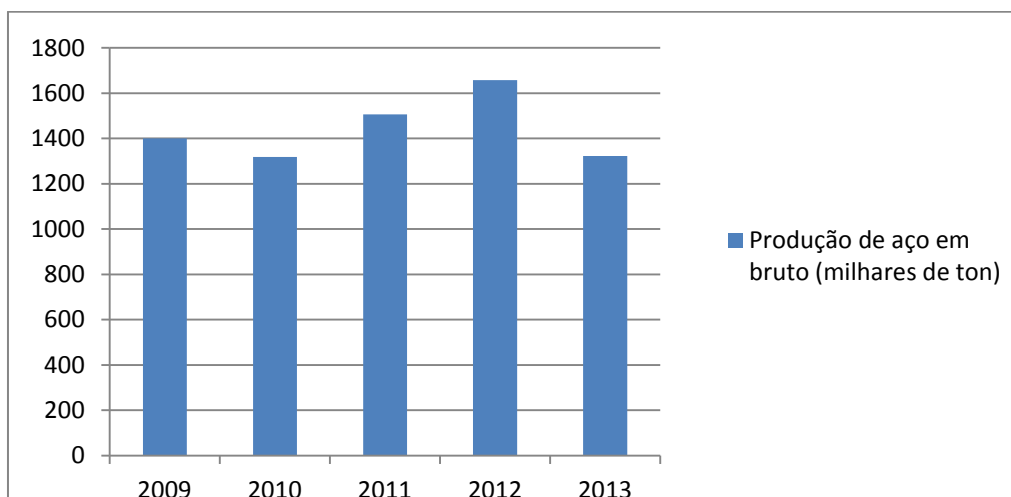


Figura 25 – Produção de aço em bruto em Portugal (Eurofer,2014)

4. Normas e legislação aplicáveis a varões de aço

A legislação sobre aços a utilizar na construção visa garantir a qualidade das construções, assegurando a segurança de pessoas e bens durante a sua utilização.

Devido ao crescimento da importação de produtos registado em Portugal, gerou-se uma necessidade cada vez maior de criar uma malha legal mais abrangente, o que leva a que a legislação aplicável se adapte de modo a proteger os interesses nacionais e os interesses da União Europeia, onde estamos inseridos. Os regulamentos portugueses, mais precisamente o REBAP (Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado), vão sendo progressivamente substituído pelos Eurocódigos e Normas Europeias.

Ao longo dos anos, a legislação sobre betão armado foi alvo de avanços e alterações. O primeiro regulamento a ser publicado no nosso país teve o nome de “Instruções Regulamentares para o Emprego de Beton Armado”, apresentado no Dec-Lei 4036 de 3/4/1918. Em 1935 surgiu o “Regulamento do Betão Armado” no Dec-Lei 25948 de 16 de Outubro e em 1967 surgiu o “Regulamento de Estruturas de Betão Armado” (REBA), publicado no Dec. 47723 de 20/5/1967, que por sua vez foi substituído pelo REBAP em 1983.

Hoje em dia, a situação do varão de aço para construção encontra-se num processo de adaptação às novas disposições legais. Atualmente existem vários documentos legais que os varões de aço têm de cumprir, sendo aplicáveis os seguintes documentos:

- Decreto-Lei n.º349-C/83, de 30 de Julho – Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado;
- prEN 10080, de Janeiro de 2005 - Steel for the reinforcement of concrete - Weldable reinforcing steel – General;
- NP EN 1992-1-1 (EC2) - Projeto de Estruturas de Betão;
- Dec. Lei n.º390/2007, de 10 de Dezembro - Condições para a colocação no mercado e importação de aço para armaduras de betão armado;
- NP EN 13670:2011 – Execução de estruturas de betão
- Especificações LNEC:
 - E449 – 1998 - Varões de aço A400 NR para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação;
 - E450 – 1998 - Varões de aço A500 NR para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação;
 - E455 – 2002 - Varões de aço A400 NR de ductilidade especial para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação;

- E456 – 2000 - Varões de aço A500 ER para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação;
- E460 – 2002 - Varões de aço A500 NR de ductilidade especial para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação.
- Documentos de Classificação LNEC (atualizados e publicados regularmente).

Seguidamente são analisados os documentos anteriormente indicados, com o objetivo de descrever a informação relevante que cada um contém.

4.1 – Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado

Existem 5 artigos no REBAP referentes às armaduras ordinárias a aplicar em betão armado: 21º, 22º, 23º, 24º e 25º, sendo que os temas de cada um são:

- Artigo 21º - Características gerais;
- Artigo 22º - Tipos correntes de armaduras ordinárias;
- Artigo 23º - Classificação e homologação de armaduras ordinárias;
- Artigo 24º - Módulo de elasticidade;
- Artigo 25º - Relações tensões-extensões de cálculo.

O artigo 21º define que a caracterização das armaduras deve ser feita tendo em conta aspetos como as suas características mecânicas, de aderência e geométricas, podendo ainda ser tido em consideração a sua soldabilidade.

A determinação destas características deve ser feita de acordo com as normas portuguesas, ou de acordo com os critérios e especificações do LNEC.

Relativamente ao processo de fabrico, as armaduras podem ser de aço natural, laminado a quente, ou de aço endurecido a frio por torção, tração, trefilagem ou laminagem a frio.

O artigo 22º contém uma tabela (Tabela 4) que apresenta as características mecânicas e geométricas a que tem que obedecer cada lote de varões para lhe ser atribuída determinada classe, para os vários tipos correntes de armaduras ordinárias. É apresentado o valor característico das tensões e extensões, sendo ainda indicado neste artigo que a relação entre a tensão de rotura e a tensão de cedência não deve ser inferior a 1,05.

Tabela 4 – Quadro V do REBAP – Tipos correntes de armaduras ordinárias

| Designação | Processo de fabrico | Configuração da superfície | Características de aderência | Características mecânicas | | | | | | | |
|-------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|--|----------------------|---|----------------|----------------|----------------|
| | | | | Tração (1) | | | Dobragem (2) | | | | |
| | | | | Tensão de cedência f_{yk} (3) (Mpa) | Tensão de rotura f_{tk} (Mpa) | Extensão após rotura ϵ_{yk} (4) (%) | Dobragem simples (5) | Dobragem-desdobragem (6) conforme o diâmetro dos varões, \emptyset (mm) | | | |
| | | | | 12< \emptyset ≤18 | 18< \emptyset ≤25 | 25< \emptyset ≤32 | 32< \emptyset ≤40 | | | | |
| A235 NL | Laminado a quente | Lisa | Normal | 235 | 360 | 24 | 2 \emptyset | - | - | - | - |
| A235 NR | | Rugosa | Alta | | | | 2 \emptyset (7) | 5 \emptyset | 7 \emptyset | 8 \emptyset | 10 \emptyset |
| A400 NR | Laminado a quente | Rugosa | Alta | 400 | 460 | 14 | 3 \emptyset (7) | 6 \emptyset | 8 \emptyset | 10 \emptyset | 12 \emptyset |
| A400 ER | Endurecido a frio | Rugosa | Alta | 400 | 460 | 12 | 3 \emptyset (7) | 6 \emptyset | 8 \emptyset | 10 \emptyset | 12 \emptyset |
| A400 EL | Endurecido a frio com torção | Lisa | Normal | | | | 4 \emptyset (7) | - | - | - | - |
| A500 NR | Laminado a quente | Rugosa | Alta | 500 | 550 | 12 | 4 \emptyset (7) | 8 \emptyset | 10 \emptyset | 12 \emptyset | 14 \emptyset |
| A500 ER | Endurecido a frio | Rugosa | Alta | 500 | 550 | 10 | 4 \emptyset (7) | 8 \emptyset | 10 \emptyset | 12 \emptyset | 14 \emptyset |
| A500 EL (8) | | Lisa | Normal | | | | 4 \emptyset | - | - | - | - |

(1) Ensaio segundo a Norma Portuguesa NP-105. Para os aços endurecidos, estas características devem ser determinadas após envelhecimento artificial (30 minutos a 250° C e arrefecimento à temperatura ambiente).

(2) Os valores indicados no quadro designam os diâmetros dos mandris, sendo \emptyset o diâmetro dos varões

(3) Ou tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%, f_s 0,2k

(4) Comprimento de referência inicial igual a 5 \emptyset .

(5) Ensaio segundo a Norma Portuguesa NP-173, com ângulo de dobragem de 180°.

(6) Dobragem a 90° segundo a Norma Portuguesa NP-173, seguida de aquecimento durante 30 min a 100°C, arrefecimento à temperatura ambiente e posterior desdobragem de 20°.

(7) Somente exigido para varões com diâmetro igual ou menor que 12 mm.

(8) Somente sob a forma de redes electrosoldadas.

Relativamente à dobragem, é condição de aprovação do lote, que após os ensaios de dobragem haja uma probabilidade de 95% de os varões não apresentarem qualquer fenda. Excetuando os varões A235 NL, é ainda exigido que as armaduras possuam marcas indeléveis que permitam a sua identificação em obra.

No artigo 23º é exigido, com exceção das armaduras de aço A235 NL, que o aço utilizado em armaduras ordinárias seja classificado ou homologado pelo LNEC. A classificação consiste num documento que em função das características apresentadas, indique o tipo a que estas pertencem, e caso seja necessário, indique outras propriedades que sejam relevantes para a aplicação do Regulamento. A classificação é aplicável a armaduras correntes, mais precisamente às referidas no Quadro V do REBAP (Tabela 4). Relativamente às armaduras que não possam ser classificadas como de tipo corrente, é exigida a sua homologação que constará de um documento em que são definidas as condições de utilização em função das características apresentadas.

O artigo 24º indica que, para as armaduras ordinárias, o módulo de elasticidade deve ser considerado igual a 200GPa.

O artigo 25º refere-se ao método pelo qual devem ser obtidos os valores de cálculo dos esforços resistentes de modo a que seja verificada a segurança.

No ponto 1 deste artigo, são estudadas as relações tensão-extensão de cálculo dos aços referidos anteriormente no *Quadro V* do REBAP do artigo 22º (Tabela 4), sendo depois especificados os valores de cálculo para a verificação de segurança de elementos em relação aos estados limites últimos de resistência e encurvadura.

É ainda referido que os valores de cálculo da tensão de cedência à compressão ($f_{sy cd}$) e da tensão de cedência à tração ($f_{sy d}$), são obtidos dividindo os respectivos valores característicos por um coeficiente de segurança γ_s , que toma o valor de 1,15.

No ponto 2 deste artigo, é referido que podem ser utilizadas outras relações tensão-extensão, desde que sejam devidamente justificadas e utilizem os mesmos critérios de segurança utilizados no estabelecimento das relações definidas no ponto 1.

No seguimento deste artigo é ainda indicado com mais pormenor a forma de determinar o diagrama de cálculo e o diagrama simplificado de cálculo das relações tensão-extensão, partindo do diagrama real, sendo referidas as expressões que relacionam estas grandezas.

4.2 - prEN 10080:2005 - Steel for the reinforcement of concrete

O ponto 6 deste documento refere-se ao fabrico de aço para varões e arames para aplicação na construção, sendo indicado que o produtor ou o fabricante podem escolher o processo de fabrico que quiserem, desde que seja divulgado a pedido do comprador.

O desenrolamento do material em bobines deverá ser feito por equipamento específico, sendo proibida a utilização no betão de varões obtidos pela laminagem de outros com diâmetro diferente (ex: laminagem em obra de varões com diâmetros superiores e posterior aplicação).

No ponto 7, mais precisamente em 7.2, é descrito o desempenho do aço relativamente a várias características mecânicas. Define-se o valor característico em termos probabilísticos e em que condições devem ser realizados os ensaios que determinam as várias grandezas que são responsáveis pela caracterização das propriedades do material.

No ponto 8 são referidas as regras mínimas que devem ser cumpridas pelo fabricante para que os seus produtos estejam em conformidade com este documento e com as características apresentadas, independentemente do seu processo de fabrico.

Em primeiro lugar são indicadas as necessidades relativas à seleção de amostras que serão ensaiadas, de maneira a determinar as propriedades dos produtos siderúrgicos aplicados na construção e seguidamente é feita a avaliação dos resultados e do modo de agir para manter ou melhorar os resultados obtidos.

No ponto 9, referente aos métodos de ensaio, o documento remete para as EN ISO 15630-1 e EN ISO 15630-2, dependendo do que se pretende determinar, sendo ainda indicada a tabela apresentada de seguida, que define os requisitos das amostras de acordo com o seu método de fabrico e o uso a que se destinam.

Tabela 5 – adaptado da *Tabela 3* da EN 10080 – Requisitos para teste de propriedades mecânicas

| Condições de fabrico e entrega do produto | Condições de teste |
|--|--------------------------------|
| Atados produzidos por laminagem a quente | Na entrega ou antes de aplicar |
| Atados produzidos por laminagem a frio | Antes de aplicar |
| Produzido como bobine e entregue desbobinado | Antes de aplicar |
| Produzido e entregue em bobines | Desbobinado e antes de aplicar |
| Produzido com recurso a soldadura | Antes de aplicar |
| Treliças | Antes de aplicar |

4.3 - NP EN 1992-1-1:2010, Eurocódigo 2 - Projeto de Estruturas de Betão

O presente documento normativo estabelece uma série de requisitos que os aços devem respeitar para poderem ser comercializados e aplicados em betão armado caso não cumpram o que está definido na EN 10080. O *Quadro C.1* do EC2 (Tabela 6) apresenta propriedades que devem ser determinadas segundo o estipulado na EN 10080.

A abordagem ao aço para betão armado começa a ser feita no ponto 3.2 do presente regulamento, sendo definido o âmbito da sua aplicação a varões, malhas soldadas e produtos devidamente desenrolados, excluindo produtos que tenham algum tipo de revestimento especial.

É feita depois a diferenciação entre a tensão de cedência indicada na EN 10080 representada por R_e , e a tensão de cedência indicada no EC2 representada por f_{yk} . O valor

de R_e é obtido no âmbito do controle da qualidade a longo prazo e o valor de f_{yk} é o valor da tensão de cedência de um varão específico a aplicar numa certa estrutura, não existindo qualquer relação direta entre ambos. A diferença consiste no método utilizado para a obtenção da característica medida.

As propriedades que caracterizam o comportamento do aço encontram-se no ponto 3.2.2 e são as seguintes:

- Tensão de cedência, (f_{yk} ou $f_{0,2k}$);
- Tensão de cedência máxima real, ($f_{y,max}$);
- Ductilidade (ϵ_{uk} e f_t/f_{yk});
- Resistência à tração, (f_t);
- Soldabilidade;
- Resistência à fadiga;
- Dimensão e tolerâncias das secções;
- Aptidão à dobragem;
- Características de aderência;
- Resistência ao corte e à soldadura para redes electrossoldadas e vigas em treliça préfabricadas.

Este documento só é aplicável no caso de a tensão de cedência se situar no intervalo de valores $400\text{MPa} < f_{yk} < 600\text{MPa}$.

Os diversos valores de resistência são abordados no ponto 3.2.3, sendo indicado que o valor real da tensão de cedência máxima, $f_{y,max}$, não deverá ser superior a $1,3f_{yk}$.

O ponto 3.2.4 refere-se à ductilidade do aço, sendo indicado que a ductilidade adequada é definida por dois parâmetros:

- k , o valor característico da razão entre a tensão de rotura e a tensão de cedência (f_t/f_y);
- ϵ_{uk} , extensão da carga máxima.

Na Tabela 6 é feita uma divisão dos aços por categorias (A, B e C), estando esta divisão relacionada com os valores de ϵ_{uk} e de k .

Tabela 6 – Quadro C.1 do EC2 – Propriedades das armaduras

| Forma do produto | Varões e fios | | | Redes electrossoldadas | | | Requisito ou valor do quantilho (%) |
|---|--------------------------------|-------------|-------------------------|------------------------------------|-------------|-------------------------|-------------------------------------|
| Classe | A | B | C | A | B | C | - |
| Valor característico da tensão de cedência f_{yk} ou $f_{0,2k}$ (MPa) | 400 a 600 | | | | | | 5,0 |
| Valor mínimo de $k = (f_t/f_y)_k$ | $\geq 1,05$ | $\geq 1,08$ | $\geq 1,15$ $< 1,35$ | $\geq 1,05$ | $\geq 1,08$ | $\geq 1,15$ $< 1,35$ | 10,0 |
| Valor característico da extensão à tensão máxima, ϵ_{uk} (%) | $\geq 2,5$ | $\geq 5,0$ | $\geq 7,5$ | $\geq 2,5$ | $\geq 5,0$ | $\geq 7,5$ | 10,0 |
| Aptidão à dobragem | Ensaio de dobragem/desdobragem | | | - | | | |
| Resistência ao corte | - | | | $0,3 A f_{yk}$ (A é a área do fio) | | | Mínimo |
| Tolerância máxima da massa nominal (varão ou fio isolado) (%) | Dimensão nominal do varão (mm) | | | | | | 5,0 |
| | ≤ 8 | | | $\pm 6,0$ | | | |
| | > 8 | | | $\pm 4,5$ | | | |

NOTA: Os valores da amplitude de tensões de fadiga com um limite superior de βf_{yk} e da área relativa mínima das nervuras a utilizar num determinado país poderão ser indicados no respectivo Anexo Nacional. Os valores recomendados são indicados no Quadro C.2N. O valor de β a utilizar num determinado país poderá ser indicado no respectivo Anexo Nacional. O valor recomendado é 0,6.

Estão também incluídos no EC2 os diagramas de tensão-extensão típicos para o aço laminado a quente e endurecido a frio (Figura 26).

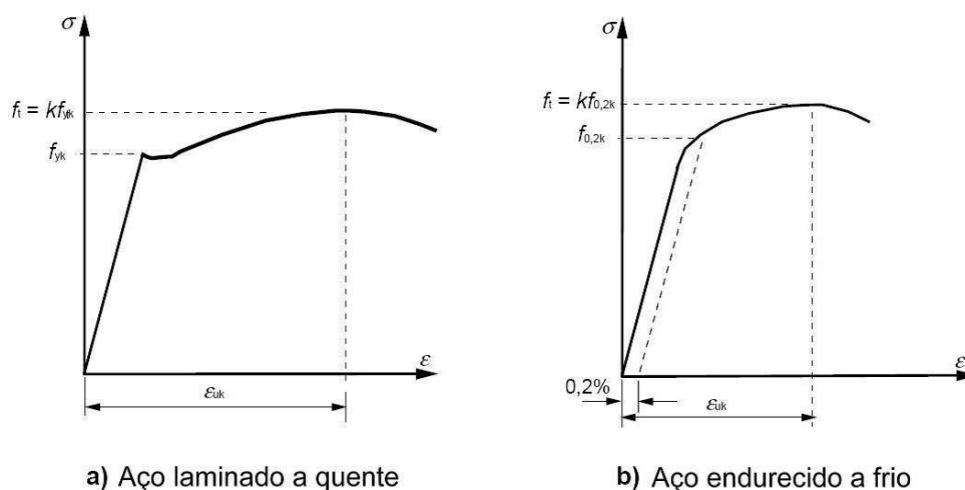


Figura 26 – Figura 3.7 do EC2 - Diagramas de tensão-extensão típicos de varões de aço laminado a quente (a) e endurecido a frio (b)

A resistência à fadiga do material é abordada no ponto 3.2.7, havendo 2 pontos neste item relativamente às hipóteses de cálculo.

No ponto 1 indica-se que o cálculo se deve basear na área nominal da secção transversal do elemento, não contando com as nervuras, e que se devem usar os valores característicos das várias propriedades.

No ponto 2 são apresentados dois diagramas tensão-extensão (Figura 27), distintos somente troço superior. Um diagrama apresenta o troço superior inclinado, indicativo de endurecimento, com uma extensão limite ϵ_{ud} e tensão máxima Kf_{yk}/γ_s . No outro diagrama, o troço superior é horizontal não apresentando limite em relação à extensão.

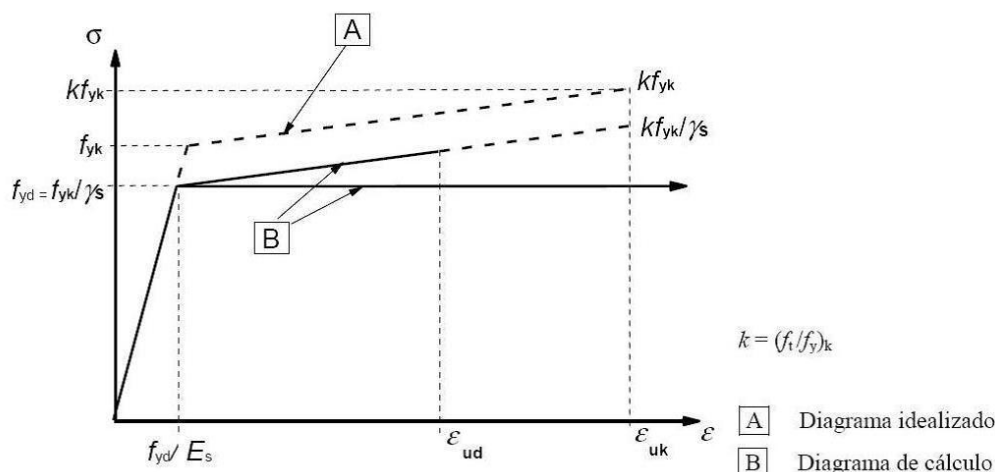


Figura 27 – Figura 3.8 do EC2 – Diagrama tensão-extensão de cálculo para varões de aço

4.4 - Decreto-Lei n.º390/2007

O presente Decreto-Lei, (Condições para a colocação no mercado e importação de aço para armaduras de betão armado) surgiu com o intuito de substituir o Dec. Lei 441/99 de 2 de Novembro e complementar o Dec. Lei 349-C/83, de 30 de Julho (REBAP).

No artigo 4º deste documento é estabelecido que o aço a utilizar em armaduras só pode ser colocado no mercado se for previamente certificado por um organismo acreditado pela entidade competente no domínio da acreditação em conformidade com as metodologias do Sistema Português da Qualidade (SPQ).

No artigo 5º do mesmo documento, é estipulado que a certificação deve assegurar a conformidade do aço para utilização em armaduras para betão armado com as normas ou especificações técnicas portuguesas aplicáveis ou com normas europeias ou normas ou especificações técnicas equivalentes de outro Estado Membro da União Europeia, da Turquia ou de um Estado subscritor do Acordo sobre Espaço Económico Europeu. É referido que a recolha de amostras e a realização de ensaios de controlo externo, bem como a

elaboração dos relatórios de apreciação dos resultados dos ensaios deve ser efectuada por entidades devidamente credenciadas para o efeito no âmbito do SPQ.

É indicado ainda neste artigo que os relatórios e certificados de conformidade devem ser reconhecidos e aceites caso cumpram o estipulado no nº2 do artigo 9.º do Decreto-Lei n.º113/93, de 10 de Abril, que diz que estes são conformes caso obtenham resultados satisfatórios em ensaios realizados por entidades reconhecidas pelo Estado membro de que fazem parte, desde que executados de acordo com os métodos em vigor em Portugal, ou considerados equivalentes pelo IPQ.

4.5 – NP EN 13670:2011 – Execução de estruturas de betão

Esta Norma especifica um conjunto de requisitos técnicos para a execução das estruturas de BA, estabelecendo uma série de verificações a incluir no projeto de execução de forma a fornecer ao construtor toda a informação necessária para a execução da estrutura.

4.5.1 – Materiais

Relativamente às armaduras, a Norma NP EN 13670 refere 5 pontos que merecem especial atenção:

- No ponto 1 é referido que as armaduras devem estar em conformidade com a prEN 10080 e com as disposições válidas no local da construção;
- No ponto 2 é somente referido que cada produto deve ser facilmente identificável;
- No ponto 3 é indicado que os acopladores e os dispositivos de amarração devem estar de acordo com o especificado na ENV 1992-1-1, uma Aprovação Técnica Europeia ou com as disposições válidas no local da construção;
- No ponto 4 é referido que, de modo a maximizar a aderência entre aço e betão, a superfície das armaduras deve estar livre de ferrugem solta e de substâncias que possam prejudicar o processo;
- No ponto 5 é referido que só podem ser utilizadas armaduras de aço galvanizado quando se utiliza um cimento que não afete desfavoravelmente a aderência entre ambos.

4.5.2 - Transporte e armazenamento

Segundo a Norma NP EN 13670, o transporte de armaduras no interior do estaleiro deve ser efetuado por equipamento de elevação, devendo ser garantida a solidez dos pontos de elevação, bem como a indeformabilidade da armadura. A descarga dos atados de varão deve ser realizada, suspendendo-os por dois pontos equidistantes e com resistência adequada, através de um pórtico indeformável suspenso do gancho;

É rigorosamente proibido efetuar a elevação dos molhos pelos atilhos que envolvem os atados. A movimentação mecânica deve ser efetuada com os estropos adequados e, preferencialmente, com correntes em vez de cabos de aço ou cintas;

Para o armazenamento dos varões deve ter-se em consideração que o comprimento comercial dos mesmos é de 12 metros e que estes não devem estar em contacto com o terreno. Recomenda-se a colocação de travessas (por exemplo, vigas ou prumos de madeira, vigas de betão) sob os varões com um afastamento de cerca de 2 metros. Deve também separar-se os varões por diâmetros, interpondo entre cada grupo prumos afastados de cerca de 2 metros, constituindo baias de separação entre varões de diâmetros diferentes. Estes prumos podem ser constituídos por madeira, tubos de aço ou, por vezes, varões de grande diâmetro (20mm ou superior), os quais são cravados no terreno ou inseridos numa bainha tubular executada em maciço de betão. Para depósito de varões curtos (resultantes de utilização parcial) constroem-se, por vezes, estantes nos prumos de separação entre varões.



Figura 28 – Exemplo de armazenamento do aço evitando o contacto com o solo (www.civil.ist.utl.pt)

4.5.3 - Inspeção e ensaio de armaduras

Todos os aços recebidos em obra têm de fazer ensaios obrigatórios conforme Documento Nacional de Aplicação (DNA) 11.2 – Inspeção de materiais e produtos, da NP EN 13670 de 2011 e do Decreto-Lei n.º 301/2007 de 23 de Agosto, que ao abrigo do artigo 6.º, torna obrigatórios estes ensaios para as estruturas objeto das classes de inspeção 2 e 3 estabelecidas na NP EN 13670, podendo a amostragem ser efetuada no local da entrega destes produtos na obra pelo produtor sob controlo do utilizador.

4.5.3.1 – Classes de execução das construções

A inspeção é efetuada em função das classes de execução, que são indicadas nas especificações de projeto. A classe de execução é definida de acordo com:

- Tipo de construção;
- Tipo de elementos estruturais;
- Tipo de construção/tecnologias a aplicar;
- Tipo de materiais a aplicar.

Segundo a norma NP EN 13670 existem 3 classes de execução. As diferenças relativamente aos parâmetros anteriormente descritos são indicadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Classes de Execução

| | Classe de Execução 1 | Classe de Execução 2 | Classe de Execução 3 |
|---|---|--|---|
| Tipo de construção | - Edifícios até 2 andares | - Edifícios com mais de 2 andares até 12 - Pontes correntes com vãos < 40m | - Edifícios com mais de 12 andares - Pontes especiais - Grandes barragens - Edifícios para centrais nucleares - Reservatórios |
| Tipo de elementos estruturais | - Lajes e vigas de betão armado com vãos < 10 m - Pilares e paredes simples - Estruturas de fundações simples | - Lajes e vigas de betão armado com vãos > 10m - Pilares e paredes esbeltos - Maciços encabeçando estacas - Arcos com vão < 10m | - Arcos e abóbadas de betão armado - Elementos fortemente comprimidos - Fundações especiais - Arcos com vão > 10m |
| Tipo de construção /tecnologias | - Estruturas com elementos pré-fabricados | - Estruturas com elementos pré-fabricados | - Estruturas com elementos pré-fabricados - Tolerâncias especiais |
| Tipo de materiais em obra: - Betão conforme a NP EN 206-1: - Classe de exposição: - Armaduras: | Até C25/30, inclusive; X0, XC1, XC2. De betão armado | Qualquer classe de resistência; Qualquer classe de exposição. De betão armado e de préesforço | Qualquer classe de resistência; Qualquer classe de exposição. De betão armado e de préesforço |

O tipo de inspeção que é requerido para cada classe de execução, segundo a NP EN 13670, está referido na Tabela 8.

Tabela 8 – Tipo de inspeção requerido por classe de execução

| | Classe de Execução 1 | Classe de Execução 2 | Classe de Execução 3 |
|--------------------------------|---|--|--|
| Tipo de inspeção | - Inspeção visual e medições aleatórias | - Inspeção visual e medições sistemáticas e regulares das maiores obras | - Inspeção visual - Inspeção pormenorizada de todas as obras importantes face à capacidade portante e durabilidade da estrutura |
| Quem realiza a inspeção | - Auto-inspeção | - Auto-inspeção - Inspeção de acordo com os procedimentos do construtor - Possíveis requisitos adicionais de especificação de execução | - Auto-inspeção - Inspeção de acordo com os procedimentos do construtor - Requisitos adicionais da especificação de execução |
| Âmbito | - Todas as obras | - Além da auto-inspeção, deve haver uma inspeção sistemática e regular das obras | - Além da auto-inspeção, deve haver uma inspeção sistemática e regular das obras |

4.5.3.2 – Receção das armaduras em obra

Os produtos portadores da marcação CE ou certificados por entidade independente devem ser recepcionados confrontando a guia de remessa e por inspeção visual:

a) Devem ser apresentados ao dono de obra ou a quem o represente, juntamente com a guia de remessa de cada fornecimento entregue em obra:

I. O certificado do produtor ou o relatório dos ensaios feitos pelo produtor correspondente ao aço fornecido, o documento de classificação ou homologação dos aços pelo LNEC e, no caso dos aços certificados, a licença para o uso da marca produto certificado.

II. Logo que os aços sejam objeto da marcação, o Certificado de Conformidade CE passado pelo Organismo Notificado e a Declaração de Conformidade CE do produtor.

b) Para efetuar os ensaios de receção das armaduras, o empreiteiro deve dividir o aço em lotes de fornecimento, sendo o lote caracterizado por provir do mesmo produtor e ser do mesmo tipo de aço (e no caso de aço de pré-esforço, do mesmo diâmetro). O número mínimo de amostras a colher em cada lote e as dimensões deste são as seguintes:

I. armaduras de aço ordinárias: 2 amostras por cada 50 toneladas;

II. armaduras de aço de pré-esforço: 2 amostras por cada 25 toneladas;

III. armaduras de aço certificadas: o número de amostras é metade do atrás indicado para armaduras não certificadas.

Ao receber o material no estaleiro, as verificações a efetuar são:

- Conformidade do Aço:

A conformidade do aço verifica-se se este respeitar os critérios definidos nos artigos 21º e 22º do REBAP. Para tal deverá ser feita uma inspeção aos certificados de conformidade e guias de remessa, inspeção essa que deverá ser feita em todos os fornecimentos, sempre com a presença do Encarregado Geral e do Diretor de Obra adjunto. Por fim, deve ser feito o registo na Ficha de Registo e Controlo de Materiais.

- Diâmetro do varão:

Relativamente ao diâmetro do varão, o Encarregado Geral é o responsável pela inspeção, sendo necessário realizar uma inspeção visual e uma medição de verificação da Guia de Remessa em todos os fornecimentos, de modo a verificar se está de acordo com a nota de encomenda do material. Após a verificação, deve ser feito o registo na Ficha de Registo e Controlo de Materiais.

- Estado do varão:

Da mesma forma que se procede no caso do diâmetro do varão, o estado do varão também só poderá ser aceite se o mesmo estiver de acordo com a nota de encomenda do material, realizando-se assim uma inspeção visual em todos os fornecimentos, acompanhados pelo Encarregado Geral. Esta inspeção deverá conter o seu registo na Ficha de Registo e Controlo de Materiais.

4.5.3.3 – Inspeção das armaduras antes da betonagem

Antes da betonagem, ao analisar o projeto de execução, devem ser realizados ensaios de modo a verificar a conformidade dos seguintes parâmetros:

- Implantação da armadura de arranque

Na implantação da armadura de arranque, deve-se garantir que o processo é realizado de acordo com o Projeto de Execução. Deve ser feita uma verificação das medições e das plantas topográficas, antes da montagem de armaduras pelos respetivos responsáveis,

Topógrafo e Encarregado Geral. O registo deste ensaio deverá ficar registado na Ficha de Verificação e Controlo.

- Número de varões, diâmetro e tipos de aço

Relativamente a este ensaio, deve-se ter em atenção que os mesmos devem estar de acordo com o Projeto de Execução, sendo que, deve-se realizar uma inspeção visual e medições por parte do Encarregado Geral antes da betonagem e por elemento a betonar. Por fim, há que registar esse efeito na Ficha de Verificação e Controlo.

- Posicionamento

Tal como o ensaio anterior, no ensaio de posicionamento deve ser respeitado o que está presente no projeto de execução, sendo realizada uma inspeção visual e medições por parte do Encarregado Geral antes da betonagem e por elemento, registando esse efeito na Ficha de Verificação e Controlo.

- Empalmes e amarrações

No caso de empalmes e amarrações, deve ser respeitado o que está presente no projeto de execução e no artigo 81º REBAP, sendo realizada uma inspeção visual e medições por parte do Encarregado Geral antes da betonagem e por elemento, registando esse efeito na Ficha de Verificação e Controlo.

- Controlo de Recobrimento

Para o ensaio de controlo de recobrimento, deve ser respeitado o que está presente na NP EN 206-1 (Tabela 27). Deve ser feita uma inspeção visual e medições por parte do Encarregado Geral antes da betonagem e por elemento, registando esse efeito na Ficha de Verificação e Controlo.

- Limpeza das armaduras

Neste ensaio, deve-se verificar se as armaduras se encontram limpas, sem depósitos superficiais, livres de ferrugem solta e sujidade proveniente do solo (terra, lama) que prejudique a aderência entre o aço e o betão. Deve ser feita uma inspeção visual por parte do Encarregado Geral antes da betonagem e por elemento, registando esse efeito na Ficha de Verificação e Controlo.

4.6 - Especificações LNEC

A comercialização de varões em Portugal pode ser feita desde que estes respeitem as normas estabelecidas no REBAP. Para além disso, é também estipulado no mesmo documento, que se deve proceder a uma classificação prévia por parte do LNEC.

As características necessárias para a classificação dos varões de aço mais comuns a aplicar em betão armado são estabelecidas pelas especificações LNEC, sendo posteriormente emitido o respetivo documento de homologação.

Áreas abordadas pelas especificações:

- Processo de fabrico;
- Características mecânicas e tecnológicas;
- Controlo da produção;
- Geometria das nervuras;
- Marcas de identificação.

O conteúdo e a estrutura das especificações para os diferentes tipos de aço são idênticos, sendo apenas nos valores relativos das várias características analisadas que existem diferenças. De seguida são descritas com maior rigor as áreas abordadas pelas especificações.

4.6.1 - Processo de fabrico

Em relação ao processo de fabrico é referido que a produção dos varões pode ser feita por laminagem a quente a partir de biletos ou por vazamento contínuo por 3 processos diferentes: laminagem a quente com deformação a frio posterior (não aplicável a aços de ductilidade especial), laminagem a quente e tratamento térmico superficial através de água e laminagem a quente sem processamento posterior.

Os varões devem ser produzidos sob a forma de varões ou de rolos, sendo proibida a laminagem de produtos já acabados, tal como é também referido no EC2.

4.2.6 - Características mecânicas e tecnológicas

As características mecânicas consideradas relevantes neste documento são a tensão de rotura (R_m), tensão de cedência (R_e), extensão total na força máxima (A_{gt}) e aptidão à dobragem.

Todas as características são obtidas por intermédio de ensaios à tração com exceção da dobragem que é obtida através de ensaios de dobragem simples ou dobragem-desdobragem.

As características mecânicas obtidas no ensaio de tração devem satisfazer os valores apresentados no *Quadro 3* da respetiva Especificação, apresentados na Tabela 9 de modo a facilitar a sua comparação. De referir que as relações $R_e/400$ ⁽³⁾ e $R_e/500$ ⁽³⁾ são apenas referidas para os varões de ductilidade especial, nomeadamente nos documentos E455 e E460 respetivamente.

Tabela 9 – Exigências de cada Especificação relativas aos ensaios de tração

| Tipo de aço | Especificação | R_e ⁽¹⁾ MPa | R_m ⁽¹⁾ MPa | A_{gt} ⁽²⁾ % | R_m/R_e ⁽²⁾ | R_m/R_e ⁽³⁾ | $R_e/400$ ⁽³⁾ | $R_e/500$ ⁽³⁾ |
|-------------|---------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| A400NR | E449 | 400 | 460 | 5 | 1,08 | - | - | - |
| A400 NR SD | E455 | 400 | - | 8 | 1,15 | 1,35 | 1,20 | - |
| A500 NR | E450 | 500 | 550 | 5 | 1,08 | - | - | - |
| A500 NR SD | E460 | 500 | - | 8 | 1,15 | 1,35 | - | 1,20 |
| A500 ER | E456 | 500 | 550 | 2,50 | 1,05 | - | - | - |

⁽¹⁾ – Valor característico mínimo referente ao quantilho de 5%

⁽²⁾ – Valor característico mínimo referente ao quantilho de 10%

⁽³⁾ – Valor característico máximo referente ao quantilho de 90%

Através da análise da Tabela 9, verifica-se que nos aços de ductilidade especial (A400 NR SD e A500 NR SD) há maior controlo das propriedades de resistência à fadiga e à rotura, ou seja, a resistência é limitada através da condição R_m/R_e e a tensão de cedência através de $R_e/400$ ou $R_e/500$, dependendo do tipo de aço, sendo ambas associadas ao valor característico máximo referente ao quantilho de 90%.

Nas E449 e E450, no ponto 8.6, os varões são considerados de ductilidade alta caso se cumpram os limites relativos à extensão total na força máxima e à relação R_m/R_e especificadas igualmente no *Quadro 3* dos respetivos documentos.

O comportamento geral do aço à tração é representado na seguinte figura:

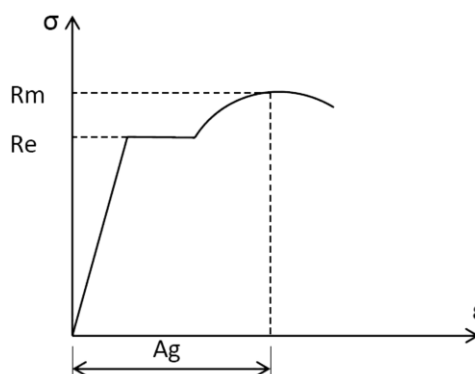


Figura 29 - Diagrama tensão-extensão típico de varões de aço

Com uma ideia geral do comportamento do aço à tração (Figura 29) e com estas grandezas definidas, consegue-se garantir que o aço a utilizar tem as características de ductilidade necessárias para ser aplicado em elementos de betão armado.

Os pontos 8.6 e 8.7 das E455 e E460 referem-se à resistência à fadiga e a ações cíclicas. Relativamente à fadiga, é exigido que os varões suportem 2 milhões de ciclos, enquanto que, relativamente às ações cíclicas, exige-se que os varões resistam a 10 ciclos sem rotura. Nas restantes especificações não são apresentadas exigências relativamente a ações cíclicas e caso sejam necessárias exigências específicas de resistência à fadiga, os varões deverão ser submetidos a ensaios de fadiga conforme especificado no ponto 10.4 das respetivas especificações. Estes ensaios de fadiga são semelhantes em todas as especificações, sendo que a única diferença entre eles são os valores relativos às tensões máximas e mínimas a que o provete é sujeito.

No ponto 10.2 das especificações são indicadas as exigências relativas ao ensaio de tração, não havendo diferenças entre elas. É indicado que o ensaio deve ser realizado segundo a Norma NP EN 10002-1 e que deve ser realizado à temperatura ambiente.

Os valores de R_e e R_m são obtidos dividindo as forças medidas no ensaio pelo valor nominal da área da secção transversal do varão.

4.6.3 - Controlo da produção

Relativamente ao controlo da produção é apenas referido que o fabricante deve efectuar um controlo contínuo da qualidade de modo a garantir a conformidade do produto com esta especificação.

4.6.4 - Geometria das nervuras

A geometria das nervuras é essencialmente utilizada para a identificação dos vários tipos de varão de aço. A descrição feita nestas especificações tem como objetivo descrever a forma como a variação nas suas dimensões e a sua orientação podem influenciar o comportamento quando o varão é sujeito a esforços.

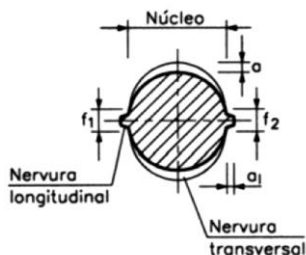


Figura 30 – Corte transversal de um varão nervurado (E450)

Todos os varões, com exceção dos lisos e dos endentados, apresentam um perfil com duas séries de nervuras transversais, podendo também existir duas nervuras longitudinais diametralmente opostas.

Varões endentados são varões cujas marcas não são feitas com nervuras salientes relativamente à secção circular do varão, sendo estas cravadas, o que leva a que as nervuras se situem num nível inferior ao limite da secção circular, tal como é demonstrado na Figura 31.

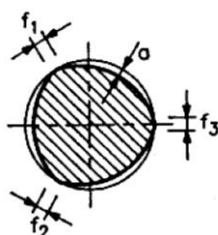


Figura 31 – Corte transversal de um varão endentado (E456)

A altura mínima das nervuras transversais, designada pela letra “a”, é igual em todas as especificações e varia com o aumento do diâmetro da secção transversal do varão de acordo com o *Quadro 4* das especificações que é representado na Tabela 10.

Tabela 10 – *Quadro 4* das Especificações E449, E450, E455 e E460 – Altura mínima das nervuras transversais

| Diâmetro Nominal (mm) | Altura mínima das nervuras transversais (mm) |
|-----------------------|--|
| 6 | 0,39 |
| 8 | 0,52 |
| 10 | 0,65 |
| 12 | 0,78 |
| 16 | 1,04 |
| 20 | 1,30 |
| 25 | 1,63 |
| 32 | 2,08 |
| 40 | 2,60 |

O afastamento e a inclinação das nervuras possibilitam a identificação de um varão, sendo apresentadas de seguida as características descritas nas especificações:

- E449, Aço A400 NR: Duas séries de nervuras transversais com afastamentos diferentes nos dois lados do varão. As nervuras da mesma série apresentam a mesma inclinação.

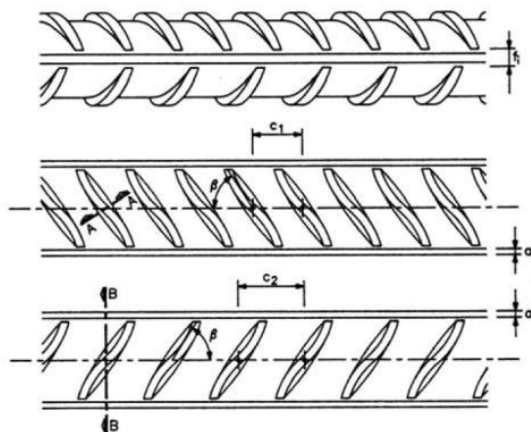


Figura 32 – Inclinação e afastamento das nervuras Aço A400 NR (E449)

- E450, Aço A500 NR: As nervuras transversais de uma das séries apresentam a mesma inclinação e um espaçamento uniforme. As nervuras da outra série estão agrupadas em duas subséries de igual afastamento mas de diferentes inclinações.

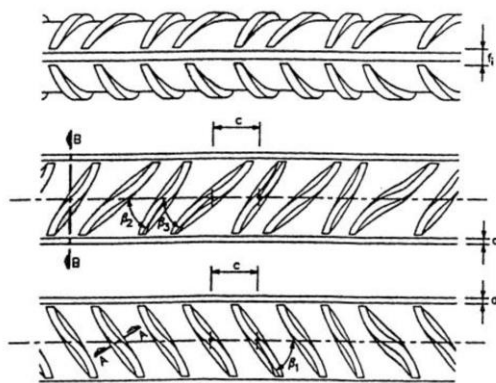


Figura 33 – Inclinação e afastamento das nervuras Aço A500 NR (E450)

- E455, Aço A400 NR SD: As duas séries de nervuras transversais apresentam afastamentos iguais e a mesma inclinação dos dois lados do varão.

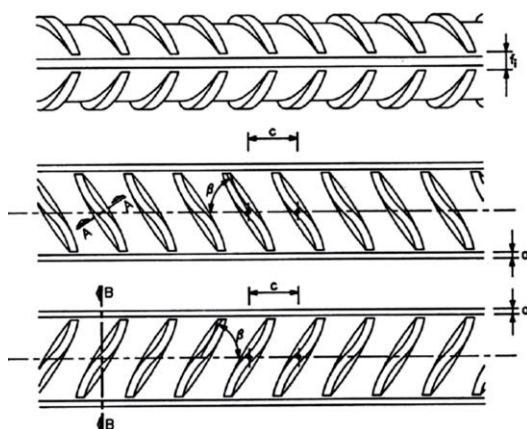


Figura 34 – Inclinação e afastamento das nervuras Aço A400 NR SD (E455)

- E460, Aço A500 NR SD: As duas séries de nervuras transversais serão semelhantes e serão constituídas por duas subséries de nervuras com inclinações diferentes e uniformemente espalhadas.

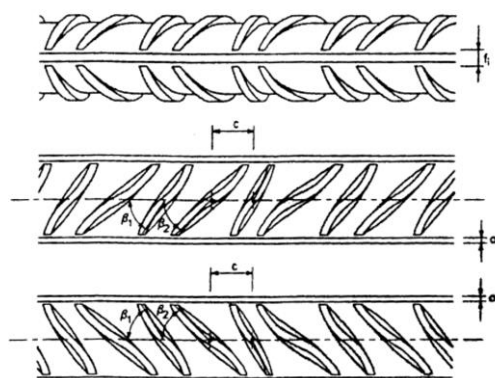


Figura 35 – Inclinação e afastamento das nervuras Aço A500 NR SD (E460)

- E456, Aço A500 ER: Três séries de nervuras transversais.

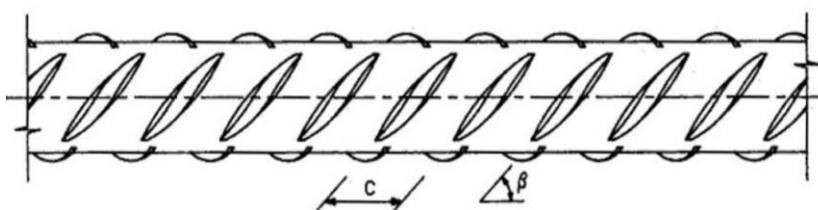


Figura 36 – Inclinação e afastamento das nervuras Aço A500 ER (E456)

O Quadro 5 de cada especificação, representado na Tabela 11, refere-se ao afastamento das nervuras transversais dos varões nas duas séries, definido pela letra “c”, e à respectiva tolerância.

A Especificação E449 contém uma tabela diferente das outras especificações relativamente ao espaçamento da nervura, uma vez que, como se pode verificar na Figura 32, este tipo de varão tem espaçamentos distintos para as duas séries de nervuras transversais.

Tabela 11 – Quadro 5 das Especificações E450, E455 e E460 – Afastamento das nervuras transversais

| Diâmetro nominal (mm) | Afastamento das nervuras transversais (mm) | Tolerâncias (%) |
|-----------------------|--|-----------------|
| 6 | 5,0 | +/- 20 |
| 8 | 5,7 | |
| 10 | 6,5 | +/- 15 |
| 12 | 7,2 | |
| 16 | 9,6 | |
| 20 | 12,0 | |
| 25 | 15,0 | |
| 32 | 19,2 | |
| 40 | 24,0 | |

Tabela 12 – Quadro 5 da Especificação E449 – Afastamento das nervuras transversais

| Diâmetro nominal (mm) | Afastamento das nervuras transversais c1 (mm) | Afastamento das nervuras transversais c2 (mm) | Tolerâncias |
|-----------------------|---|---|-------------|
| 6 | 4,2 | 5,8 | +/- 20 |
| 8 | 4,8 | 6,6 | |
| 10 | 5,5 | 7,5 | +/- 15 |
| 12 | 6,1 | 8,3 | |
| 14 | 7,1 | 9,7 | |
| 16 | 8,2 | 11,0 | |
| 20 | 10,2 | 13,8 | |
| 25 | 12,7 | 17,3 | |
| 32 | 16,3 | 22,1 | |
| 40 | 20,4 | 27,6 | |

A inclinação das nervuras transversais é outro dado que permite a identificação dos varões, a qual varia entre 35° e 75° dependendo do tipo de varão. A inclinação e a respectiva margem de erro são indicadas no ponto 9.4 das especificações.

A altura das nervuras é também um requisito a cumprir, sendo especificado que deve ser sempre inferior a $0,15\phi$. O perímetro sem nervuras transversais não deverá ser superior a 20% do perímetro do varão calculado a partir do valor do diâmetro nominal.

A área relativa das nervuras transversais, define-se como a relação entre a área da secção correspondente às nervuras e a área da secção do diâmetro nominal. O *Quadro 6* das especificações, representado na Tabela 13, apresenta os valores mínimos da área relativa das nervuras transversais para diferentes diâmetros nominais. Esta área é obtida através de uma expressão indicada nos diversos documentos.

Tabela 13 – *Quadro 6* das Especificações E449, E450, E455 e E460 – Área relativa das nervuras transversais

| Diâmetro nominal (mm) | Área relativadas nervuras transversais (cm ²) |
|-----------------------|---|
| 6 | 0,039 |
| 8 | 0,045 |
| 10 | 0,052 |
| 12 | 0,056 |
| 16 | 0,056 |
| 20 | 0,056 |
| 25 | 0,056 |
| 32 | 0,056 |
| 40 | 0,056 |

4.6.5 - Marcas de identificação

As especificações do LNEC apresentam também exigências relativamente à identificação do país onde o aço foi fabricado. De modo a fazer esta identificação, é associado um código a cada grupo de países, sendo este código obtido através do engrossamento de algumas nervuras transversais numa das séries de nervuras. A partir da segunda nervura engrossada existe um intervalo apenas de nervuras normais cujo número identifica o país de origem do varão (Tabela 14), terminando noutra nervura engrossada. Após esta existe um novo intervalo de nervuras normais cujo número identifica o produtor do varão.

Tabela 14 – N.º de nervuras para identificação do país de origem dos varões

| Países | Nº de nervuras |
|---|----------------|
| Áustria, Alemanha, Polónia, Republica Checa e Eslováquia | 1 |
| Bélgica, Holanda, Luxemburgo e Suíça | 2 |
| França e Hungria | 3 |
| Itália, Malta e Eslovénia | 4 |
| Reino Unido, Irlanda e Islândia | 5 |
| Dinamarca, Estónia, Finlândia, Letónia Lituânia, Noruega e Suécia | 6 |
| Espanha e Portugal | 7 |
| Chipre e Grécia | 8 |
| Outros países | 9 |

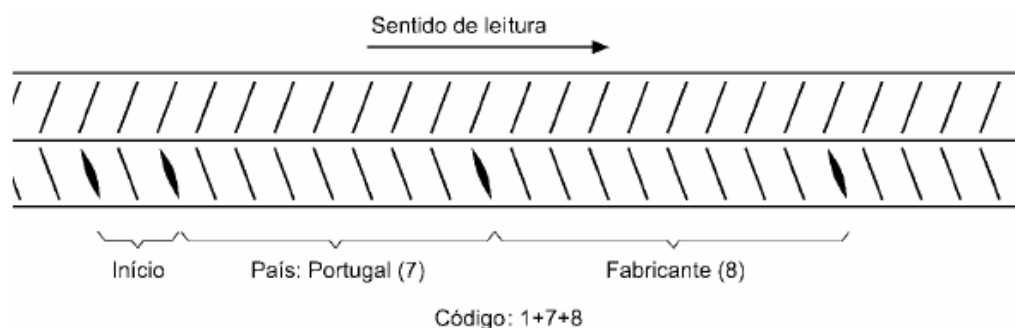


Figura 37 – Exemplo de código de marcas de identificação

4.7 - Documentos de classificação LNEC

Os documentos de classificação do LNEC resultam de ensaios de caracterização realizados pelo LNEC, sendo que, para garantir que o produto está em conformidade com a classificação, estes ensaios devem ser repetidos periodicamente.

Os documentos são constituídos por 3 pontos: Objeto, Caracterização e Classificação. De seguida é especificada a informação relevante de cada ponto referido.

- Objeto:

A elaboração deste documento remete para o artigo 23º do REBAP e são identificados os varões a classificar de modo a proceder à sua aplicação como armaduras ordinárias em betão armado e pré-esforçado.

- Caracterização:

Neste ponto, é indicado o processo de fabrico utilizado na produção do varão, sendo de seguida feita a descrição das suas marcas de identificação de maneira a que possa ser identificado entre todos os outros varões comercializados. As marcas devem apresentar inclinações e afastamentos conforme as Especificações LNEC para o tipo de aço correspondente e devem permitir a identificação da origem e do fabricante do varão. A descrição das marcas é feita de modo gráfico (como nas Figuras 32 a 36), sendo também feita a descrição de alguns pontos e representado através de figuras a configuração que as marcas devem ter.

Em relação às características mecânicas, é referido que estas devem cumprir o que está especificado na Especificação LNEC aplicável a aços semelhantes, sendo neste caso a E455 de 2010.

- Classificação:

Neste ponto, é indicado que para todos os efeitos relacionados com a sua utilização, os varões pertencem a um tipo específico de aços descritos no artigo 22º do REBAP, sendo aplicáveis todas as disposições indicadas no mesmo para esse tipo de varão.

4.8 - Análise comparativa da regulamentação

4.8.1 – Extensão na rotura

As características do diagrama tensões-extensões da armadura têm uma influência determinante na deformabilidade e distribuição de esforços nas estruturas de betão armado. A ductilidade dos elementos estruturais influencia diversos aspectos importantes do comportamento das estruturas tais como:

- Aviso prévio relativo a situações de rotura pelo aparecimento de grandes deformações;
- Capacidade de suportar deformações impostas originadas, por exemplo, por variações de temperatura, assentamentos de apoio, retração e fluência;
- Capacidade de suportar ações acidentais imprevistas sem colapso.

Relativamente à extensão na rotura, o EC2 e as Especificações LNEC definem um valor mínimo para a extensão total na força máxima, enquanto que no REBAP é imposto um valor mínimo para a extensão após a rotura. Esta diferença pode ser observada na Figura 38.

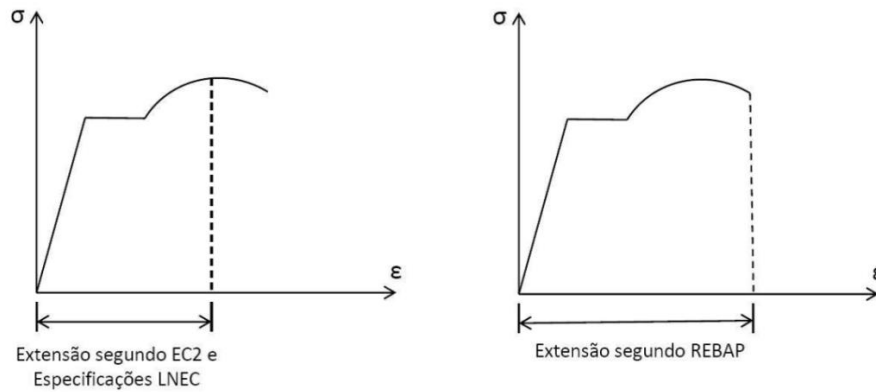


Figura 38 – Diferença da definição de extensão de rotura entre o EC2 e as Especificações LNEC e o REBAP

Em termos de cálculo e de verificação da segurança, verifica-se que os critérios impostos pelo EC2 e pelas especificações LNEC são mais conservadores quando comparados com os critérios impostos pelo REBAP.

4.8.2 – Tensão de cedência

No que se refere à tensão de cedência, as exigências para cada tipo de aço são semelhantes tanto no REBAP como nas Especificações LNEC. No EC2 não é referido um valor específico para cada tipo de aço, sendo indicado um intervalo, no qual se inserem todos os aços, sendo que este intervalo engloba os valores apresentados nos outros documentos.

Apesar da existência de mais do que um documento normativo relativo ao comportamento do aço para utilização em betão armado, o documento em vigor atualmente é o REBAP.

5. Aplicação em obra do varão de aço

5.1 - Metodologia de aplicação

Pretende-se salientar os aspetos mais relevantes da metodologia que deve ser utilizada na aplicação dos varões de aço em obra e as principais questões relacionadas com a execução das estruturas de betão armado (BA).

Para que as estruturas de BA apresentem um nível aceitável de segurança, durante o seu período de vida útil, deve existir uma estreita ligação entre o projeto e a execução do mesmo, respeitando as condições impostas pela Norma NP EN 13670. Esta Norma especifica um conjunto de requisitos técnicos para a execução das estruturas de BA, estabelecendo uma série de verificações a incluir no projeto de execução de forma a fornecer ao construtor toda a informação necessária para a execução da estrutura.

5.1.1 - Corte e dobragem

5.1.1.1 - Equipamento

As máquinas de corte e dobragem que usualmente se encontram na grande maioria dos estaleiros de armaduras em obra, são constituídas pelos elementos que se podem observar na Figura 39. Estas máquinas são controladas pelo painel de comandos e funções representado na Figura 40.

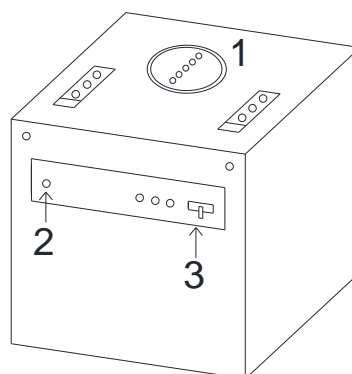


Figura 39 – Elementos da máquina de corte e dobragem (adaptada de Trigo et al., 2009)

Legenda:

- 1 – Mesa de dobragem
- 2 – Painel de comandos
- 3 – Botão de segurança

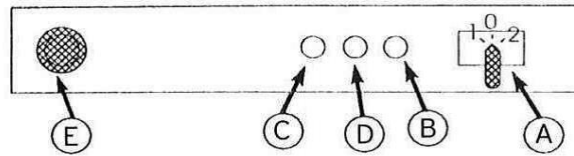


Figura 40 – Painel de comandos e funções (Trigo et al., 2009)

Legenda:

A – Comutador de ligação da máquina

Na posição 1 do prato da mesa roda no sentido dos ponteiros do relógio, na posição 2 roda no sentido inverso.

B – Luz avisadora de ligação

Este avisador acende quando o comutador A se encontra nas posições 1 ou 2.

C – Botão de pressão, para executar a operação.

D – Botão de pressão, para interromper a operação.

E – Manípulo de segurança para bloqueamento da máquina.

Pressionando este manípulo a máquina pára e todos os comandos descritos anteriormente ficam inativos.

O curso do movimento da lâmina, isto é, o ponto até onde a lâmina se desloca antes de retroceder para a posição inicial, é ajustável e previamente definido. O controlo do movimento da lâmina é efetuado no prato de dobragem (Figura 41). Sempre que se aciona o comando de execução, o prato executa um movimento de rotação e a lâmina move-se. A periferia do prato de dobragem está provida de pequenos furos, graduado de 5 em 5.

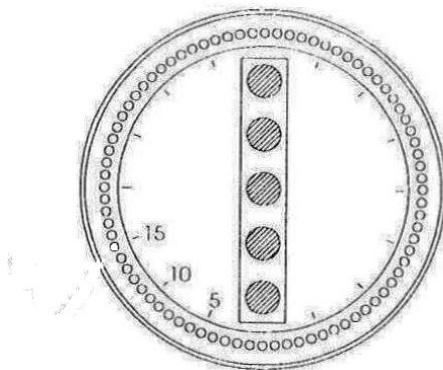


Figura 41 – Prato de dobragem (Trigo et al., 2009)

A máquina possui um jogo de acessórios, entre os quais se encontram dois pequenos pinos limitadores de movimento de diâmetro igual ao dos citados furos.

Se um pino for, por exemplo, colocado na graduação 55 e acionada a máquina, o prato roda ligeiramente e retrocede à posição inicial. Também a lâmina de corte se move, mas tão pouco que não chegaria a tocar num varão que eventualmente se quisesse cortar. Contudo,

após algumas experiências na máquina em questão, (Trigo et al., 2009) verificaram que o ajuste ideal de curso da lâmina se obtém colocando o pino limitador na graduação 15.



Figura 42 – Pino limitador de movimento (Trigo et al., 2009)

A mesa de moldagem é constituída pelo tampo metálico da máquina onde se encontra o prato de dobragem (Figura 43).

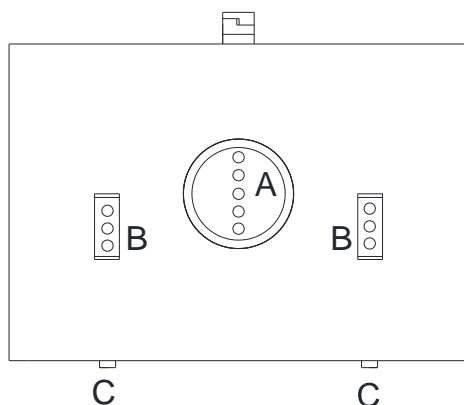
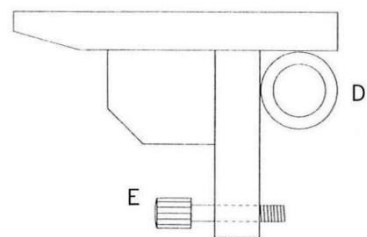


Figura 43 – Mesa de moldagem (adaptada de Trigo et al., 2009)

Legenda:

- A – Prato de dobragem
- B – Corrediças de espera
- C – Manípulos de ajuste das corrediças

A espera ajusta-se na corrediça do lado onde se coloca o varão a ser moldado, servindo para amparar o mesmo durante a moldagem (Figura 44). A espera é imobilizada na corrediça por intermédio de dois pinos limitadores, um dos quais cilíndrico (veio) e outro cuja parte superior é paralelepípedica (batente) (Figura 45). No furo central do prato coloca-se um espigão cilíndrico cuja parte superior é de menor diâmetro, e num dos furos próximos, outro dos espigões fornecidos com a máquina.



D - Eixo da espera
E - Parafuso de regulação

Figura 44 – Espera da mesa de moldagem (Trigo et al., 2009)

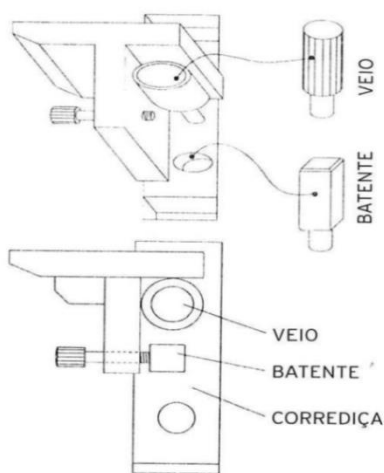


Figura 45 – Posição do veio e batente de espera (Trigo et al., 2009)

No espigão central adaptam-se casquilhos acessórios, aumentando-lhe o diâmetro, consoante o raio de curvatura que se pretende imprimir ao varão (Figura 47). A distância entre os dois espigões onde se coloca o varão deve apresentar uma folga de pelo menos 2mm, em relação ao diâmetro do varão. A posição da espera é afinada relativamente aos espigões, através da movimentação da corrediça e do parafuso de ajuste ao batente. A amplitude de rotação do prato é controlada pela colocação de um pino limitador num dos furos da graduação periférica (Figura 48). Os diâmetros dos pinos não devem ser muito pequenos em relação ao diâmetro dos varões a serem dobrados, uma vez que, as nervuras dos varões de aço podem agarrar nos pinos e travar o processo de dobragem, provocando quebras e fissuras (Trigo et al., 2009).

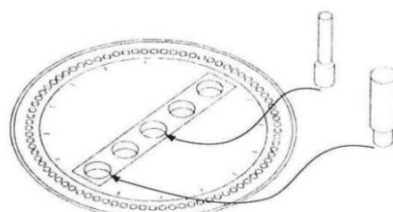


Figura 46 – Colocação dos espigões no prato de dobragem (Trigo et al., 2009)

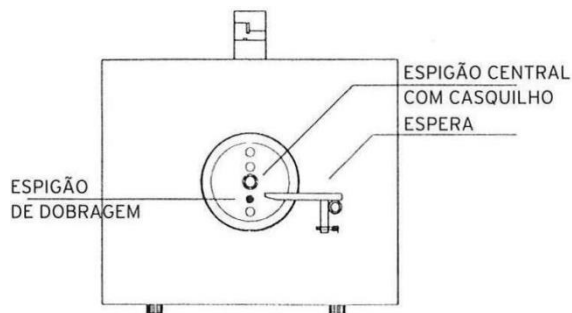


Figura 47 - Adoção de casquilhos acessórios (Trigo et al., 2009)

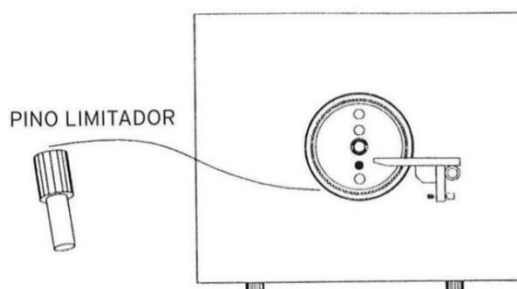
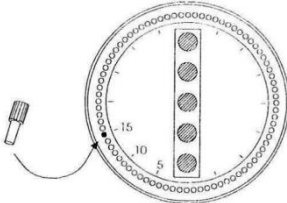


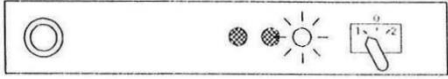
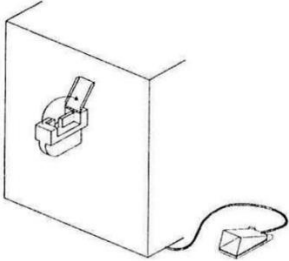
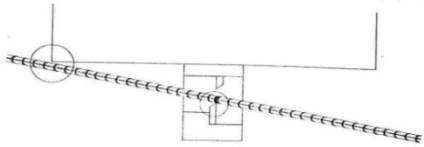
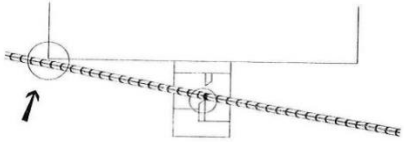
Figura 48 – Colocação do pino limitador (Trigo et al., 2009)

5.1.1.2 - Metodologia de corte de aço em varão

Segundo (Trigo *et al.*, 2009), a metodologia de corte dos varões está descrita na Tabela 15.

Tabela 15 – Metodologia de corte de aço em varão

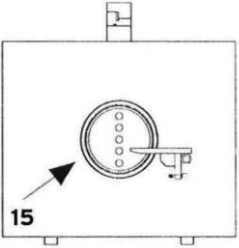
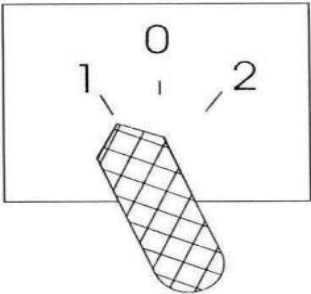
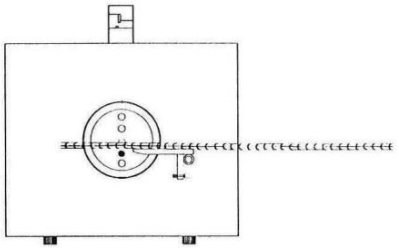
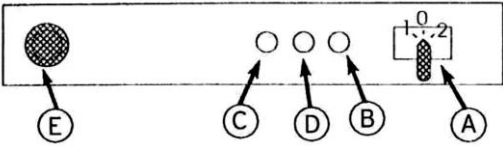
| | |
|--|--|
| <p>1) Efetuar medições e marcar os varões</p> | <p>2) Retirar todos os acessórios que estejam na mesa de dobragem</p> |
| <p>3) Ligar e posicionar o comando de pedal junto à guilhotina</p> | <p>4) Colocar no prato de dobragem 1 pino limitador na graduação 15</p>  |

| | |
|--|---|
| <p>5) Rodar o comutador do painel para a posição 1</p>  | <p>6) Levantar a tampa da guilhotina</p>  |
| <p>7) Executar o comando, verificando se o curso da lâmina é o ideal</p> | <p>8) Colocar o varão na guilhotina, fazendo coincidir a marcação com a aresta de corte da lâmina fixa</p>  |
| <p>9) Segurando o varão para que do lado da lâmina fixa este fique bem encostado à máquina, executar o comando através do pedal</p> | <p>10) Deve-se verificar se a mesa se encontra isenta de materiais ou acessórios e encostar o varão à máquina, antes de executar o comando</p>  |

5.1.1.3 - Metodologia de dobragem de aço em varão

Segundo (Trigo *et al.*, 2009), a metodologia utilizada para efetuar uma dobragem a 90° está descrita na Tabela 16.

Tabela 16 – Metodologia de dobragem de aço em varão

| | |
|--|--|
| <p>1) Colocar o espigão central e o espigão (guia)</p> | <p>2) Caso necessário, colocar o casquilho de raio de dobragem</p> |
| <p>3) Colocar a espera e efetuar à respetiva regulação</p>  | <p>4) Para dobragens a 90°, colocar um pino limitador na posição 15</p> |
| <p>5) Ligar o comutador na posição</p>  | <p>6) Colocar o varão na mesa de moldagem e através do respetivo manipulo afinar o ajuste da espera</p>  |
| <p>7) Acionar o comando de dobragem C, controlando se o varão fica com o ângulo de dobragem desejado</p>  | <p>8) Caso seja necessário interromper a operação, pressiona-se o comando D</p> |

| | |
|---|--|
| 9) Para executar dobragens a 45° o pino limitador deve ser colocado na posição 25 | 10) É importante manter a tampa da guilhotina fechada, tomar as precauções necessárias evitando que o comando de pedal seja acidentalmente acionado, assegurar-se que o comutador se encontra na posição correcta e segurar o varão durante a operação de dobragem |
|---|--|

5.1.2 - Montagem e colocação de armaduras

As armaduras destinam-se a serem integradas no betão, com a finalidade de absorverem parte das cargas a que o elemento vai ficar sujeito.

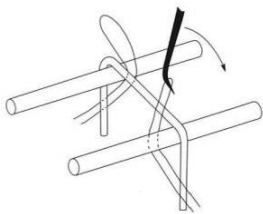
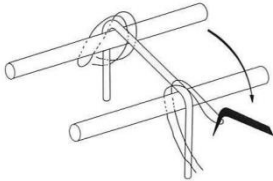
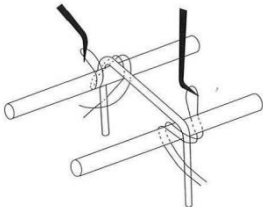
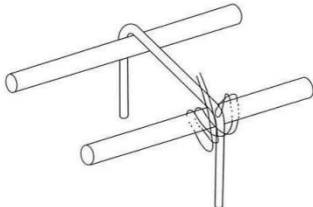
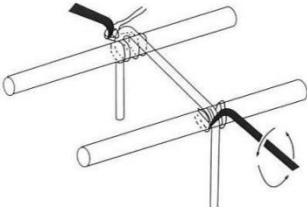
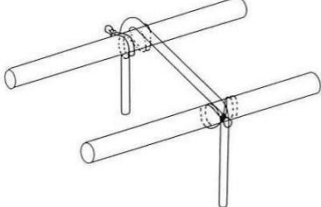
É importante respeitar os diâmetros dos varões e as posições indicadas no projeto, para além de se garantir também uma perfeita amarração dos varões e espaçadores. No caso de malhas em ambas as faces, executa-se em primeiro lugar a malha da face mais afastada do operário. A distância entre malhas é garantida com a utilização de cérceas (Trigo *et al.*, 2009).

5.1.2.1 - Amarração de armaduras

A amarração manual de armaduras é um processo que pode ser realizado de duas formas distintas: Ponto de amarração em cruz e Ponto de amarração simples.

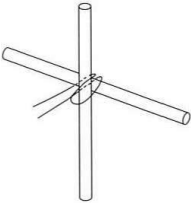
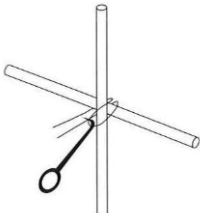
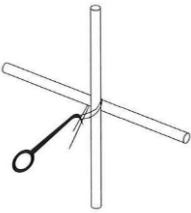
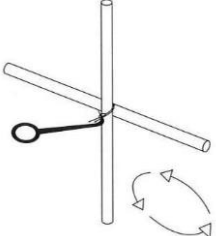
O ponto de amarração em cruz tem como objetivo ligar estribos ou cintas às armaduras longitudinais e em sapatas do tipo gaiola. O ponto de amarração em cruz deve ser utilizado nas vigas, pilares e sapatas que possuam armadura dupla. Segundo (Trigo *et al.*, 2009), a metodologia de execução está representada na Tabela 17:

Tabela 17 – Metodologia de execução do ponto de amarração em cruz

| | |
|--|---|
| <p>1) Retirar um fio da meada e dobrá-lo ao meio</p> | <p>2) Curvar ligeiramente o arame para cima da zona da dobra, de modo a facilitar a sua passagem por baixo do varão e a entrada do bico da chave</p> |
| <p>3) Passar o arame pelo lado esquerdo do estribo ou cinta e por baixo do varão principal</p>  | <p>4) Passar o arame por cima do estribo, em diagonal, com a ponta da chave de amarração introduzida na dobra do arame</p>  |
| <p>5) Com o auxílio da chave, passar o arame por trás do varão principal, de baixo para cima</p>  | <p>6) Cruzar de novo o estribo em diagonal, da direita para a esquerda</p>  |
| <p>7) Dobrar as pontas do arame, por cima do bico da chave</p>  | <p>8) Torcer o arame até ajustar os varões, para deixar o arame bem esticado</p>  |

O ponto de amarração simples tem como objetivo ligar entre si os varões das malhas horizontais, como é o caso das malhas de lajes e sapatas. Segundo (Trigo *et al.*, 2009), a metodologia de execução está representada na Tabela 18:

Tabela 18 – Metodologia de execução do ponto de amarração simples

| | |
|--|---|
| <p>1) Retirar um fio da meada e dobrá-lo ao meio</p> | <p>2) Abraçar o fio aos varões na zona do cruzamento destes;</p>  |
| <p>3) Colocar a extremidade da chave entre os dois fios, no ponto da dobragem;</p>  | <p>4) Com a ajuda da mão, dobrar as pontas por cima da chave;</p>  |
| <p>5) Torcer o arame, através da rotação da chave, até ajustar os varões, mas tendo atenção para não romper o arame;</p>  | <p>6) Dobrar as pontas do arame para que não fiquem salientes.</p> |

Na amarração de malhas (sapatas, lajes, paredes, etc.) a execução dos pontos deve ser em ZIG-ZAG, conforme indicado na Figura 49.

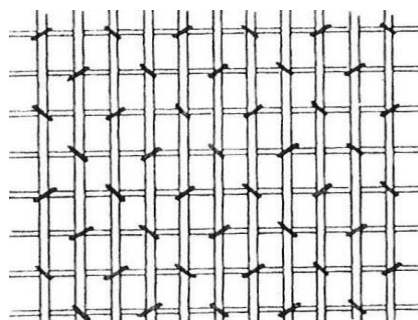


Figura 49 - Pontos de amarração executados em ZIG-ZAG (Trigo *et al.*, 2009)

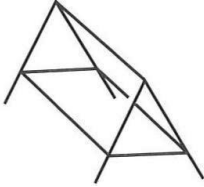
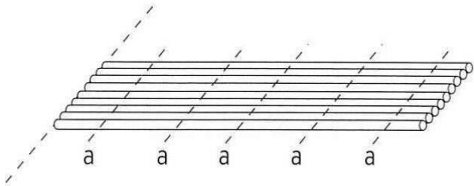
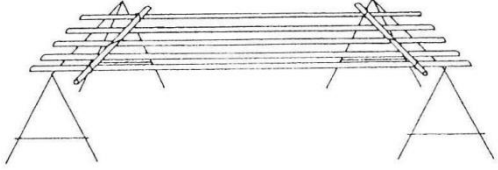
5.1.2.2 - Montagem de armaduras em estaleiro

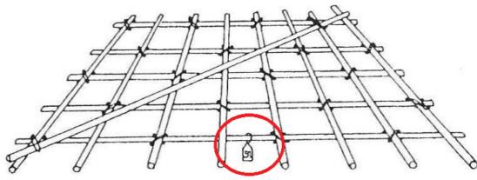
Segundo a Portaria nº 146/2006 de 20 de Fevereiro, o Armador de Ferro é um profissional que executa e monta armaduras de aço para a realização de trabalhos em BA, com base no projeto e tendo em conta as medidas de segurança, higiene e saúde no trabalho.

- Sapatas (Malha simples):

Para executar este processo os materiais e ferramentas necessários são: varão de aço, arame queimado, cavaletes, chave de amarração, turquês, fita métrica e giz. A sua metodologia de execução, segundo (Trigo *et al.*, 2009), está descrita na Tabela 19.

Tabela 19 – Montagem da armadura de sapatas em estaleiro

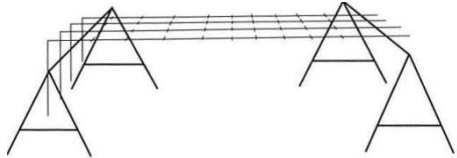
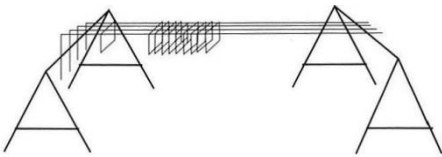
| | |
|---|--|
| <p>1) Consultar o projeto de Betão Armado, de modo a recolher a informação necessária</p> | <p>2) Preparar os cavaletes de apoio à montagem</p>  |
| <p>3) Colocar os varões inferiores sobre a bancada e marcar os afastamentos da armadura superior</p>  | <p>4) Repetir o processo com dois varões superiores para a marcar o afastamento inferior</p> |
| <p>5) Nas marcações junto às extremidades, sobrepor os dois varões da armadura superior já marcados</p>  | <p>6) Acertar os varões da armadura inferior com as marcações dos varões da armadura superior</p> |
| <p>7) Executar a amarração dos dois varões com ponto em cruz</p> | <p>8) Colocar os restantes varões da armadura superior, acertando-os com as marcas. Amarrá-los com ponto simples, cruzamento sim, cruzamento não</p> |

| | |
|---|--|
| <p>9) De modo a fazer o travamento do conjunto, colocar e amarrar com ponto simples um varão diagonal</p> | <p>10) Prender à armadura uma etiqueta com a referência da sapata</p>  |
|---|--|

- Pilares

Para executar este processo os materiais e ferramentas necessários são os mesmos que no caso anterior (sapatas). A sua metodologia de execução, segundo (Trigo *et al.*, 2009), está descrita na Tabela 20.

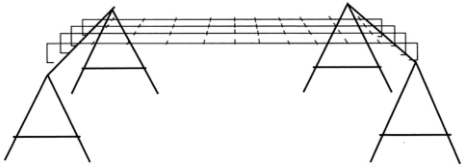
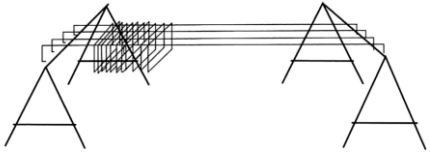
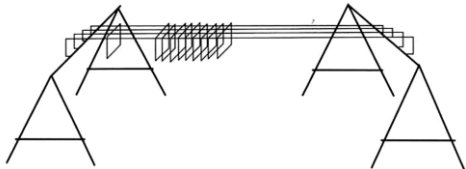
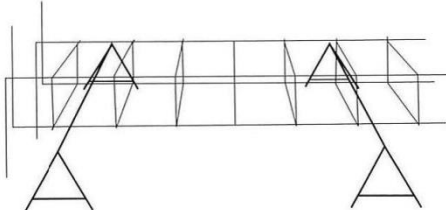
Tabela 20 – Montagem da armadura de pilares em estaleiro

| | |
|--|---|
| <p>1) Preparar os cavaletes</p> | <p>2) Colocar os varões da armadura longitudinal sobre os cavaletes</p> |
| <p>3) Medir e marcar com giz o afastamento entre cintas, no conjunto dos varões. Inspeccionar a distribuição de modo a certificar se ficou correta</p>  | <p>4) Amarrar a cinta na extremidade de dois varões, com ponto em cruz</p>  |
| <p>5) Repetir a operação no centro e ao extremo oposto dos mesmos varões</p> | <p>6) Fazer amarração das restantes cintas, começando por um dos extremos. Inspeccionar de modo a certificar se ficaram bem seguras</p> |
| <p>7) Rodar o conjunto das cintas e varões já amarrados, para que as cintas fiquem suspensas pelos varões que ainda não estão amarrados</p> | <p>8) Identificar com uma etiqueta a referência do pilar</p> |

- Vigas:

Para executar este processo os materiais e ferramentas necessários são os mesmos que nos casos anteriores. A sua metodologia de execução, segundo (Trigo *et al.*, 2009), está descrita na Tabela 21.

Tabela 21 – Montagem da armadura de vigas em estaleiro


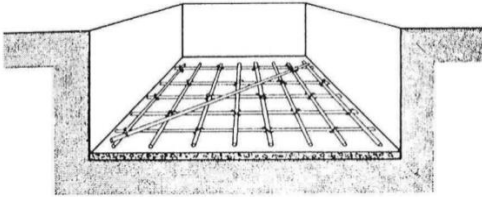
| | |
|---|---|
| <p>1) Preparar os cavaletes de apoio à montagem</p> | <p>2) Colocar a armadura longitudinal sobre os cavaletes</p> |
| <p>3) Medir e marcar com giz o afastamento entre os estribos no conjunto dos varões</p>  | <p>4) Colocar o número de estribos necessários nos varões longitudinais</p>  |
| <p>5) Amarrar um estribo numa extremidade da armadura superior com pontos em cruz</p>  | <p>6) Repetir a operação no extremo oposto</p> |
| <p>7) Executar outra vez a operação na marca mais ao centro dos varões. Amarrar os restantes estribos, iniciando a amarração num dos extremos</p> | <p>8) Rodar o conjunto da armadura superior e estribos, de modo a que estes fiquem suspensos pelos varões da armadura inferior</p>  |
| <p>9) Colocar os varões dos levantamentos e efetuar a sua amarração</p> | <p>10) Colocar uma etiqueta com a referência da viga</p> |

5.1.2.3 - Montagem de armaduras no local de aplicação

- Sapatas

Para executar este processo os materiais e ferramentas necessários são: espaçadores de betão, chave de amarração, nível de bolha, fio de alinhamento e arranca pregos. Segundo (Trigo *et al.*, 2009), a metodologia de execução está representada na Tabela 22.

Tabela 22 – Montagem da armadura de sapatas em no local de aplicação

| | |
|--|---|
| <p>1) Verificar se as medidas da fundação e alinhamentos estão de acordo com a Planta de Fundações</p> | <p>2) Verificar se os níveis do betão de regularização estão de acordo com o estabelecido nas peças desenhadas no projeto</p> |
| <p>3) Certificar-se que a etiqueta da armadura corresponde à sapata onde vai ser aplicada</p> | <p>4) Colocar a armadura;</p>  |
| <p>5) Montar os espaçadores de betão necessários, com o auxílio do arranca pregos, verificando e corrigindo a posição da armadura</p>  | |

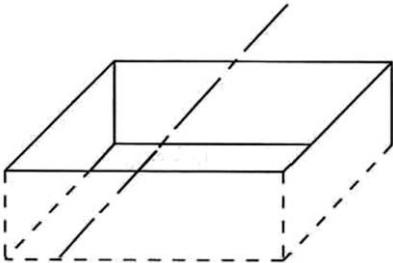
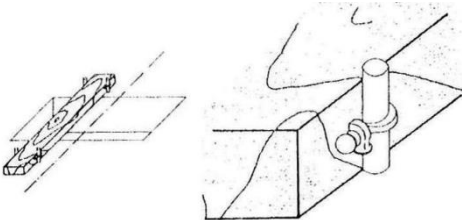
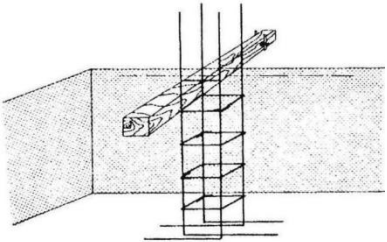
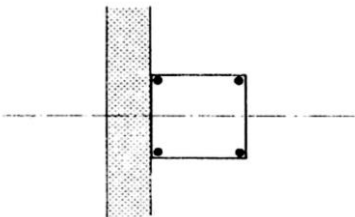
As armaduras de sapatas destinam-se a serem integradas no betão com o objetivo de absorver uma parte das cargas transmitidas pelos pilares.

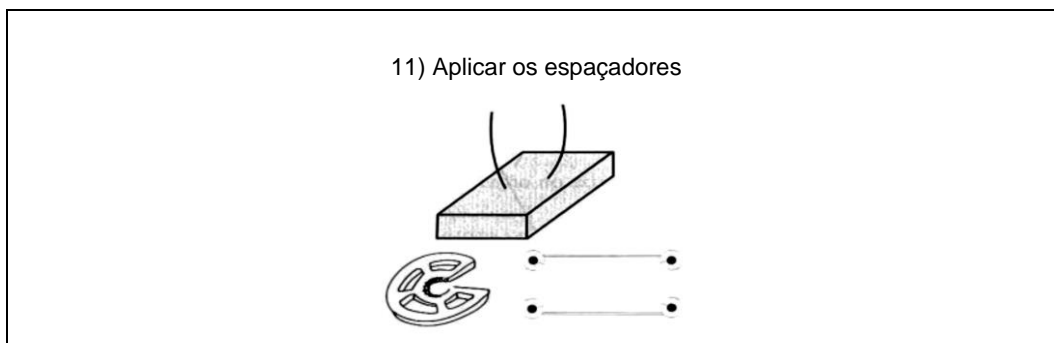
É importante impedir o desabamento de terras para dentro da “caixa” da sapata e posicionar a armadura de modo a evitar o contacto com a terra.

- Pilares:

Para executar este processo os materiais e ferramentas necessários são: arame queimado, espaçadores de betão, pregos, chave de dobrar ferro, martelo, esquadro, turquês, fio-de-prumo, fita métrica, fio de alinhamento e giz. Segundo (Trigo *et al.*, 2009), a metodologia de execução está representada na Tabela 23:

Tabela 23 – Montagem da armadura de pilares no local de aplicação

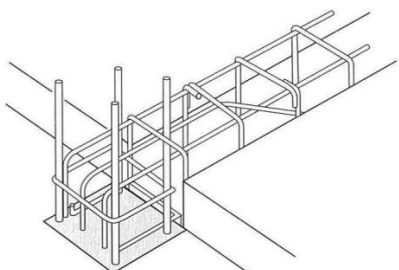
| | |
|--|--|
| <p>1) Estender o fio de alinhamento ao eixo na direção da menor dimensão da sapata</p>  | <p>2) Em paralelo com o fio, assenta-se uma viga de madeira no solo, afastada deste metade da dimensão do pilar</p> |
| <p>3) Cravar no solo 4 pontas de varão e encostá-las às faces da viga, de modo a mantê-la na posição correta</p> | <p>4) Fixar a viga às estacas, com pregos “virados”</p>  |
| <p>5) Colocar o pilar sobre a malha da sapata, encostando a armadura à viga de madeira relativamente próxima da posição que irá ocupar</p> | <p>6) Passar o fio de alinhamento por dentro da armadura do pilar e perpendicularmente à viga de madeira, definindo o outro eixo do pilar</p>  |
| <p>7) Fazer coincidir o eixo do pilar com o fio de alinhamento</p>  | <p>8) Escorar o pilar com madeiras ou varões</p> |
| <p>9) Executar a amarração do pilar à sapata</p> | <p>10) Fixar os varões da armadura longitudinal do pilar à viga de madeira com pregos “virados”</p> |



- Vigas:

Para executar este processo os materiais e ferramentas necessários são: arame queimado, espaçadores de betão, pregos, chave de amarração, martelo, arranca pregos e fita métrica. Segundo (Trigo *et al.*, 2009), a metodologia de execução está representada na Tabela 24:

Tabela 24 – Montagem da armadura de vigas no local de aplicação

| | |
|--|--|
| 1) Colocação da viga sobre a cofragem | 2) Encastrar um dos topos num dos pilares para que a armadura da viga fique por dentro da do pilar |
| 3) Executar a mesma operação no outro pilar | 4) Colocação dos espaçadores de betão na viga |
| 5) Fazer o alinhamento da armadura em relação à cofragem | 6) Executar a amarração de ambos os lados da viga aos pilares, com ponto simples  |

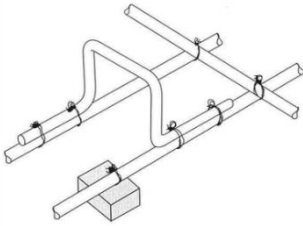
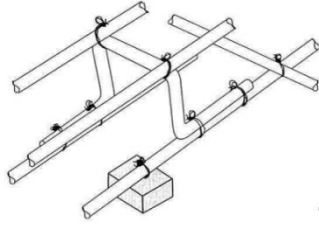
O objetivo deste procedimento consiste no posicionamento e fixação das armaduras na respectiva localização em obra.

É importante encastrar os varões longitudinais da viga, no interior do pilar e nunca se esquecer dos espaçadores de betão.

- Lajes (Malha dupla):

Para executar este processo os materiais e ferramentas necessários são: arame queimado, varão de aço, chave de amarração e arranca pregos. Segundo (Trigo *et al.*, 2009), a metodologia de execução está representada na Tabela 25:

Tabela 25 – Montagem da armadura de lajes no local de aplicação

| | |
|---|--|
| <p>1) Executar a malha inferior</p> | <p>2) Colocar e amarrar as cérceas, com ponto simples, à armadura principal da malha inferior, de modo a que estas fiquem bem fixas</p>  |
| <p>3) Fazer a distribuição dos varões da armadura principal da malha superior</p> | <p>4) Amarrar os varões às cérceas e nas extremidades com ponto simples</p>  |
| <p>5) Distribuir e amarrar os varões da armadura secundária</p> | <p>6) Levantar os varões principais que não se apoiaram nas cérceas e fazer a sua amarração aos varões secundários</p> |
| <p>7) Fazer a verificação da posição dos separadores</p> | |

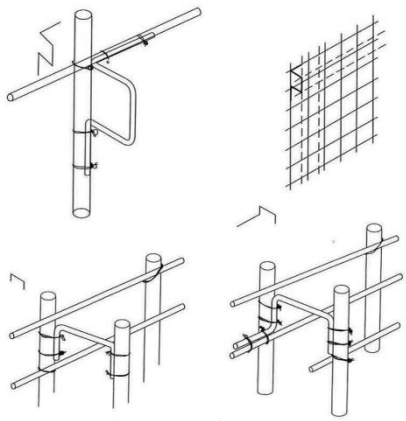
Esta tarefa tem o objetivo de fabricar a armadura a ser integrada no betão para absorver parte dos esforços a que a laje vai ficar sujeita.

- Paredes:

Para executar este processo os materiais e ferramentas necessários são: arame queimado, varão de aço, chave de amarração, tesoura ou guilhotina, fita métrica, chave de dobrar ferro,

dobradora, esquadro, martelo, bancada, giz e lápis. Segundo (Trigo *et al.*, 2009), a metodologia de execução está representada na Tabela 26:

Tabela 26 – Montagem da armadura de paredes no local de aplicação

| | |
|---|--|
| <p>1) Recolher informações presentes no desenho da estrutura de Betão Armado do tipo e classe do aço, diâmetro dos varões e distribuição dos varões</p> | <p>2) Amarrar os primeiros varões verticais à malha da sapata, com um afastamento de aproximadamente 3 metros entre eles</p> |
| <p>3) Amarrar com ponto simples os varões horizontais</p> | <p>4) Fazer a marcação do afastamento dos varões verticais, colocar e amarrar os restantes varões verticais</p> |
| <p>5) Distribuir e amarrar cérceas para posicionar a armadura</p>  | <p>6) Colocar os espaçadores no cruzamento dos varões</p> |

As armaduras das paredes destinam-se a serem integradas no betão, com a finalidade de absorverem parte das cargas a que o elemento vai ficar sujeito.

5.1.2.4 - Espaçadores

Os espaçadores são utilizados com a função de garantir o recobrimento mínimo das armaduras pelo betão. A sua colocação deve ser feita no varão que se encontra mais saliente em cada peça.

Na Tabela 27 indicam-se os valores do recobrimento mínimo e do recobrimento nominal (valor mínimo acrescido da tolerância de execução) para 50 e 100 anos segundo a NP EN 206-1 (LNEC E469), tendo em conta a agressividade do ambiente.

Tabela 27 – Recobrimentos mínimos e nominais (E469)

| | (mm) | X0 | XC1 | XC2/XC3 | XC4 | XD1/XS1 | XD2/XS2 | XD3/XS3 |
|---|----------------|----|-----|---------|-----|---------|---------|---------|
| Tempo de vida útil do projeto de 50 anos | Recob. mín. | 10 | 15 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |
| | Recob. nominal | 20 | 25 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 |
| Tempo de vida útil do projeto de 100 anos | Recob. mín. | 20 | 25 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 |
| | Recob. nominal | 30 | 35 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 |

Por outro lado, a especificação LNEC E469 refere os materiais, dimensões e a colocação dos espaçadores em lajes, vigas, pilares e paredes.

1. Materiais

Relativamente aos materiais, a especificação indica que devem ser usados preferencialmente espaçadores de argamassa de cimento, podendo também ser usados espaçadores de plástico em elementos de classe de exposição ambiental X0, XC1 e XC2.

O cimento utilizado nos espaçadores deve ser CEM I ou CEM II/A e ter uma resistência à compressão mínima de 50 MPa. Já a tensão de resistência à rotura pode ser determinada em cubos, de acordo com as normas EN 12390-2 e EN 12390-3 no que se refere ao fabrico, conservação e ensaio.

Antes da sua aplicação, os espaçadores devem ter pelo menos 28 dias de idade e os moldes a utilizar devem permitir obter superfícies rugosas para melhorar a aderência ao betão e dificultar a entrada dos agentes agressivos.

2. Dimensões

Relativamente às dimensões, a especificação indica que os espaçadores podem apresentar várias formas geométricas, desde que garantam estabilidade suficiente quando fixados ao longo das armaduras ou nas suas extremidades.

A utilização de arames previamente colocados nos espaçadores pode ser feita desde que os espaçadores tenham pelo menos 20 mm na direção da armadura que suportam e $\frac{3}{4}$ do recobrimento na direção perpendicular.

De modo a assegurar a estabilidade, os espaçadores não circulares com sistemas de auto fixação deverão ter nas duas direções ortogonais um raio de rotação superior ao recobrimento em pelo menos 5 mm. Os espaçadores circulares devem ter um apoio na armadura que seja superior a metade do recobrimento pretendido.

3. Colocação

De acordo com a E469, existem procedimentos distintos a seguir para a colocação de espaçadores na ligação das armaduras e disposição nos diversos elementos estruturais. É de referir que os espaçadores devem ser colocados a uma distância de 5 mm da zona de dobragem do varão em que se apoiam.

- Colocação em lajes

As armaduras junto ao bordo devem ser ligadas em todas as interseções. As restantes armaduras podem ter ligações alternadas nas duas direções, desde que possuam diâmetros inferiores a 20 mm e as ligações podem ser espaçadas mas sem ultrapassar 50 diâmetros do varão de menor secção.

Na face inferior, os espaçadores devem ser colocados em ziguezague em todos os varões mais próximos da cofragem e com uma distância entre si, ao longo de cada varão, inferior a 50 vezes o diâmetro de varão mais próximo da cofragem com um máximo de 1m (Figura 50).

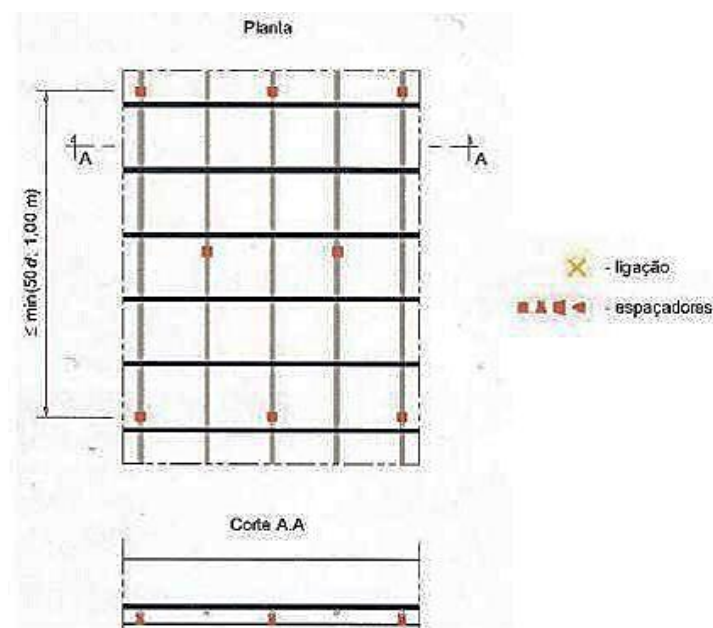


Figura 50 – Espaçadores na armadura inferior (E469)

Nos bordos, os varões perpendiculares à face e acabando em ponta, devem ter os espaçadores de topo colocados a uma distância entre si inferior a 1m (Figura 51).

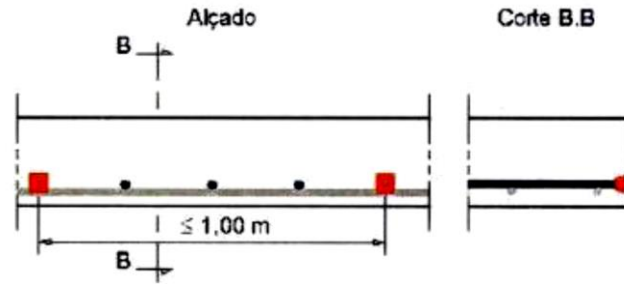


Figura 51 – Espaçadores da armadura horizontal no bordo acabando em ponta (E469)

Os varões perpendiculares ao fundo da laje devem estar ligados em todas as interseções e conter espaçadores alternados (Figura 52).

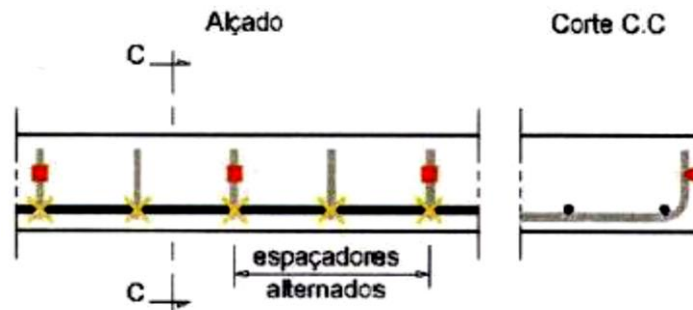


Figura 52 – Espaçadores da armadura vertical no bordo (E469)

A ligação dos varões horizontais intermédios, colocados externamente aos varões referidos no ponto anterior e paralelos aos bordos, deve ser feita de forma alternada e ter espaçadores com intervalos inferiores a 50 vezes o diâmetro de varão mais próximo da cofragem, com um máximo de 1m (Figura 53).

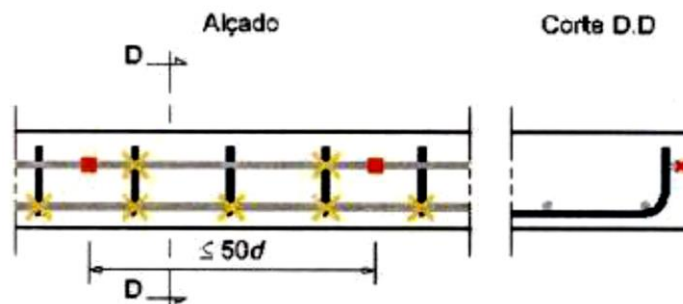


Figura 53 – Espaçadores da armadura vertical no bordo com armadura horizontal intermédia (E469)

- Colocação em vigas

Todas as extremidades dos estribos devem ser ligadas aos varões longitudinais, sendo que, o espaçamento entre ligações aos demais varões devem ser inferiores a 50 vezes o diâmetro do varão da armadura principal.

Os espaçadores devem ser colocados na base e nas duas faces laterais, em estribos situados nas extremidades e ao longo da viga, em intervalos inferiores a 1m (Figura 54).

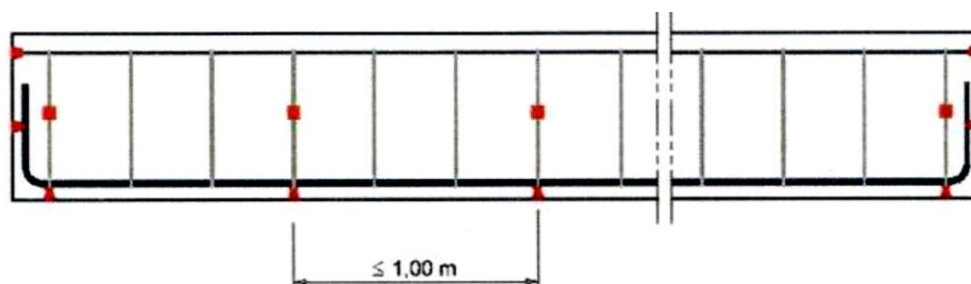


Figura 54 – Espaçadores da viga em alçado (E469)

No caso de vigas altas, nas faces laterais, o número de espaçadores a colocar deve garantir que o limite de 50 vezes o diâmetro do varão mais próximo da cofragem não é ultrapassado (Figura 55).

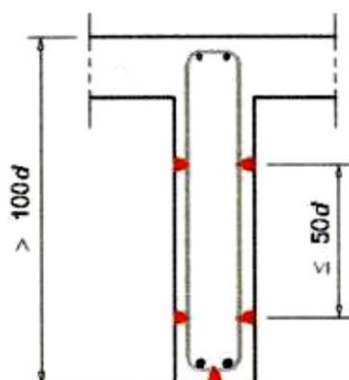


Figura 55 – Espaçadores em viga alta (E469)

- Colocação em pilares

As cintas devem estar ligadas em todas as interseções com varões longitudinais e, no caso de cintas múltiplas, devem estar ligadas entre si.

Os espaçadores devem ser colocados nas cintas do fundo, do topo e do meio do troço a betonar, e em intervalos inferiores a 100 vezes o diâmetro da armadura principal (Figura 56).

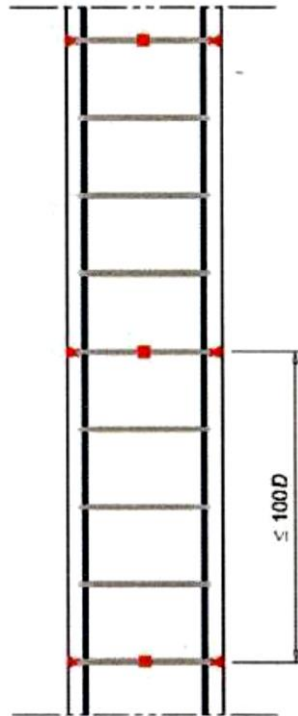


Figura 56 – Espaçadores ao longo do pilar (E469)

Nas secções retangulares ou quadradas que sejam inferiores a 50 vezes do diâmetro do varão mais próximo da cofragem, devem ser colocados 6 espaçadores como se verifica na Figura 57.

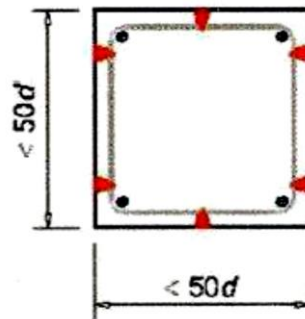


Figura 57 – Espaçadores em secção menor (E469)

Nas secções retangulares ou quadradas que sejam superiores a 50 vezes do diâmetro do varão mais próximo da cofragem, deve garantir-se que a distância entre os espaçadores ao longo de determinado lado da secção, seja inferior a 50 vezes do diâmetro do varão mais próximo da cofragem (Figura 58).

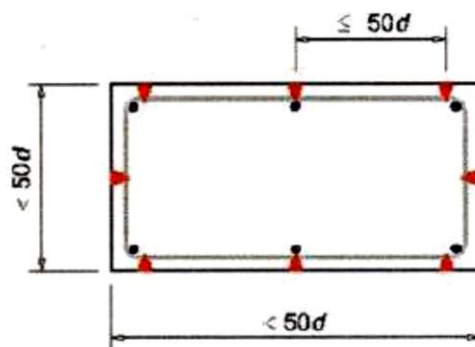


Figura 58 – Espaçadores em secção maior (E469)

Caso existam cintas múltiplas, deve verificar-se o limite indicado no ponto anterior e colocar-se um espaçador a meio da sobreposição de cintas (Figura 59).

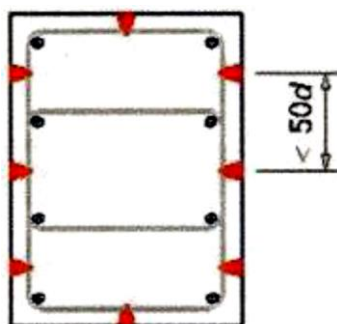


Figura 59– Espaçadores em secção com cintas duplas (E469)

As secções circulares devem ter no mínimo 4 espaçadores equidistantes, não podendo a distância entre eles ser superior a 50 vezes o diâmetro do varão mais próximo da cofragem (Figura 60).

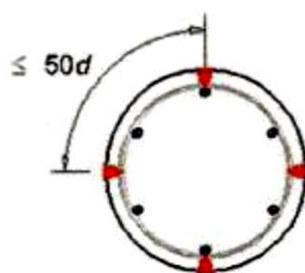


Figura 60 – Espaçadores em secção circular (E469)

- Colocação em paredes

Para as paredes aplicam-se as mesmas imposições das lajes, limitando-se no entanto a distância entre os espaçadores a um máximo de 0,5m. Os espaçadores devem ser colocados de forma simétrica nas faces verticais.

De forma a conservar a distância entre as duas malhas, deve ser dada uma especial atenção aos estribos de montagem.

Os espaçadores destinam-se a manter o afastamento entre as armaduras e a cofragem. Os tipos de espaçadores mais comuns são os espaçadores de betão (fabricados em obra ou pré-fabricados) e os espaçadores de plástico (Trigo et al., 2009).

5.1.2.4.1 - Espaçadores de betão

Embora designados correntemente por espaçadores de betão, estas peças são feitas normalmente com argamassa.

A fabricação em obra dos espaçadores de betão é efetuada num tabuleiro em que o bordo tem a dimensão do recobrimento desejado. Quando o tabuleiro está cheio de argamassa, e esta está consistente, são feitos cortes pelas marcas existentes nos bordos do tabuleiro de modo a criar paralelepípedos, onde se insere um arame de atar já preparado para o efeito. O processo fica concluído com o endurecimento dos paralelepípedos.

Atualmente existem no mercado espaçadores e fixadores de armaduras feitos de micro-betão de alto desempenho ($f_c > 50$ MPa). Estes produtos não apresentam porosidade, não se deformam e têm elevada capacidade de suporte ao peso das armaduras e aos esforços de betonagem. Estes espaçadores garantem as dimensões corretas para os recobrimentos, sendo que, a sua geometria possibilita várias soluções as diferentes situações em obra (Neto, 2006).

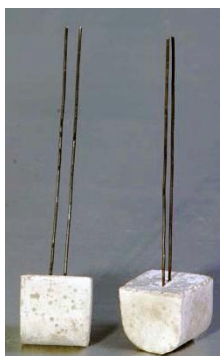


Figura 61 - Espaçadores de betão pré-fabricados (<http://www.jacp.com.br>)

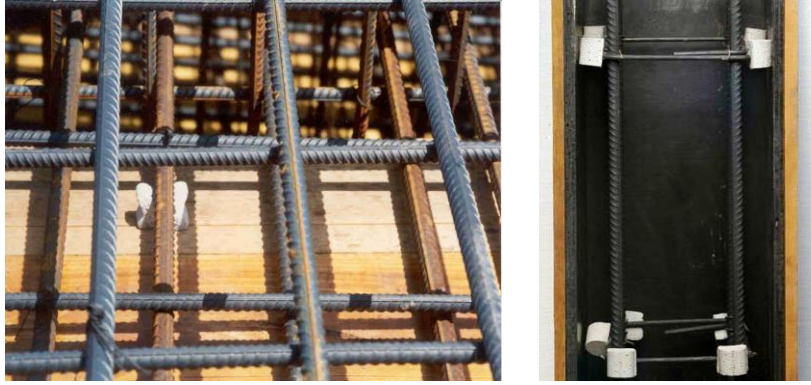


Figura 62 – Dois exemplos de aplicação dos espaçadores de betão (<http://www.jacp.com.br>)

5.1.2.4.2 - Espaçadores de plástico

Os espaçadores de plástico estão a ser cada vez mais utilizados em Portugal, acompanhando a tendência da maioria dos países europeus. A forma destes espaçadores varia consoante o elemento estrutural a que se destinam, sendo caracterizados sobretudo pela geometria muito bem definida, pelos encaixes e travas antiabertura, boa aderência ao betão, elevada resistência mecânica e fácil utilização.

1) Espaçadores circulares universais

Os espaçadores circulares universais garantem uma boa fixação da armadura e circulação do betão. São capazes de suportar grandes cargas sem partir e podem ser encaixados com a armadura montada.

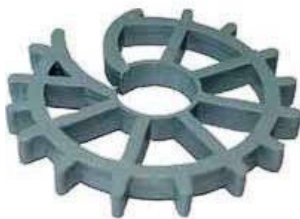


Figura 63 - Espaçador circular



Figura 64 – Aplicação do espaçador num pilar
(<http://www.ctori.com.br>)

2) Espaçadores pontuais

i. Espaçadores pontuais com fixação:

Estes espaçadores são indicados para armaduras horizontais. Para além de garantirem o recobrimento e estabilidade da armadura, facilitam caso seja necessário, a movimentação de pessoas ou máquinas sobre a armadura.

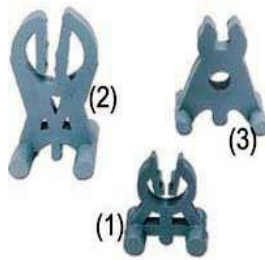


Figura 65 –Tipos de espaçador pontual com fixação
(<http://www.ctori.com.br>)



Figura 66 – Espaçador pontual com fixação em laje

ii. Espaçadores pontuais sem fixação:

A sua base circular garante grande estabilidade das armaduras, sendo geralmente usados em lajes e vigas.



Figura 67 - Espaçador para lajes e vigas (<http://www.ctori.com.br>)

3) Espaçadores lineares

Este tipo de espaçador é indicado para fundos de vigas e lajes muito pesadas.



Figura 68 – Tipo de espaçador linear
(<http://www.ctori.com.br>)



Figura 69 – Espaçador linear aplicado em laje
(<http://www.ctori.com.br>)

5.2 - Procedimentos de segurança na execução de armaduras

Antes de iniciar o trabalho, o armador de ferro deve (Trigo *et al.*, 2009):

- Certificar-se que está devidamente vestido e com os Equipamentos de Protecção Individual necessários;
- Assegurar-se que sabe o que fazer em caso de emergência e se existe algum impedimento nesse sentido;
- Verificar se as máquinas e ferramentas são adequadas, estão em bom estado e têm as devidas protecções;
- Verificar se os cabos de alimentação eléctrica às máquinas estão em bom estado e corretamente ligados;
- Certificar-se que o local de trabalho está devidamente organizado e arrumado, com as circulações desimpedidas e o piso em boas condições;
- Verificar se os meios auxiliares a utilizar são adequados, estão em bom estado e devidamente instalados ou montados;
- Ter em consideração a influência das condições climatéricas, nomeadamente a chuva, o vento e o calor ou frio intensos.

5.3 - Normas de conduta do armador de ferro

O armador de ferro deve guiar-se pelas seguintes normas de conduta (Trigo *et al.*, 2009):

- Respeitar a sinalização de segurança e os avisos afixados;
- Manter o local de trabalho arrumado e isento da acumulação de desperdícios, depositando-os no local apropriado;
- Utilizar as ferramentas e os métodos mais adequados para cada operação;
- Não transportar varões ao ombro;
- Recorrer ao auxílio de equipamento mecânico para o transporte ou elevação de conjuntos de varões ou armaduras com peso superior a 30 kg;
- Não arremessar ferramentas ou materiais, nem pedir a outro trabalhador que o faça;
- Utilizar pranchas quando houver necessidade de se deslocar sobre as armaduras;
- Adoptar posturas físicas corretas no desenvolvimento das operações;
- Não anular ou retirar elementos de protecção, quer das máquinas como da própria obra;
- Não permanecer debaixo de cargas suspensas;
- Ser previdente perante os indícios de insegurança;
- Resguardar as “armaduras de espera”, de forma a não constituírem um fator de risco.

6. CODIMETAL Engineering, S.A

Apresentam-se neste capítulo algumas considerações relativas à visita efetuada à empresa CODIMETAL Engineering, S.A, a qual teve como objetivo o estabelecimento de um contacto direto com a realidade industrial em Portugal.

A empresa CODIMETAL Engineering, S.A., tem como objetivo a transformação de aço com vista à comercialização essencialmente de varões e rede electrossoldada. Na visita verificou-se que os tratamentos aplicados ao aço são a laminagem a frio e a trefilagem, numa proporção de 90% e 10% respetivamente. Os varões iniciais são comprados às siderurgias e a aplicação destes tratamentos tem como objetivo o aumento da resistência mecânica e redução dos diâmetros (redução para valores entre 3mm e 16mm) de forma a conferir as dimensões desejadas pelo consumidor.

A maior parte dos tratamentos efetuados na empresa CODIMETAL Engineering, S.A. são através de laminagem a frio, uma vez que, comparativamente com a trefilagem, é um processo mais rápido e com menores custos, para além de que, a trefilagem só permite obter varão liso.

No processo de laminagem a frio, o varão de aço passa essencialmente por 3 fases:

- Numa primeira fase, é feita uma decapagem mecânica de modo a aliviar tensões existentes no varão;
- Numa segunda fase, é feita a lubrificação do varão com pó à base de cálcio, de modo a que, ao longo do processo este não parta.
- Numa terceira fase, o varão passa por um conjunto de 6 roletos onde é esmagado. Dependendo da redução que se pretenda fazer, as máquinas de laminagem podem possuir três ou quatro conjuntos de roletos.

A velocidade a que se desenvolve este processo varia consoante a percentagem de secção que se pretenda reduzir, o diâmetro inicial do varão e o número de conjuntos de roletos disponíveis. Por exemplo, para varões de pequena secção onde se pretende reduzir apenas uma pequena percentagem desta mesma secção, a velocidade a que os varões atravessam os roletos pode chegar aos 18 m/s.

Relativamente ao controle de qualidade, os ensaios a efetuar aos varões devem garantir que todas as grandezas analisadas respeitem as especificações LNEC, apresentadas no ponto 3.6 da presente dissertação.

Os ensaios que se realizam são os seguintes:

- Tração – Valores a verificar: Alongamento na carga máxima, carga de rotura e tensão limite de elasticidade a 0.2%;
- Aderência ao betão – Valores a verificar: Altura das nervuras, distância entre nervuras e distância entre filas de nervuras;
- Dobragem – O varão é dobrado e não pode partir nem fissurar;
- Composição química: - Este ensaio é facultativo e serve apenas para verificar quais as condições de soldabilidade do aço.

Os varões produzidos pela CODIMETAL são de aço A500ER de superfície nervurada e A500EL de superfície lisa, sendo depois comercializados em forma de bobine ou de varão em barra. O varão além de ser meio para outros produtos, como sejam, a rede electrosoldada, estribos, cintas, espiras e armaduras básicas em treliça, têm diversas aplicações noutras estruturas pré-fabricadas, como por exemplo:

- Tubos Armados;
- Vigas;
- Travessas.

7. Conclusão

Através do estudo das propriedades de uma liga metálica, verifica-se que estas são função da sua composição química e do processo a que as mesmas foram sujeitas, ou seja, da sua história térmica e mecânica. Na formação das ligas Ferro-Carbónicas o carbono assume uma grande importância sendo o principal responsável pela diferença de propriedades entre diferentes ligas.

Existem no aço seis tipos de microestruturas (Austenite, Ferrite, Cementite, Perlite, Martensite e Bainite), sendo que, o aparecimento destas microestruturas está relacionado com a composição química do aço e com as variações de temperatura a que este é sujeito.

Após o estudo efetuado sobre a evolução dos processos de fabricação de aço, verifica-se que houve uma alteração na tendência de produção. Se numa primeira fase, as técnicas de produção tinham como intenção aumentar a quantidade e a qualidade do produto final, com o passar dos anos começaram a surgir outras preocupações, como o impacto ambiental e o custo de produção. Esta alteração de prioridades aconteceu devido à grande qualidade do aço atualmente produzido e ao facto de a capacidade instalada ser suficiente para a procura existente.

Relativamente aos tratamentos mecânicos e termomecânicos efetuados ao aço (laminagem, estiragem e trefilagem), verifica-se que surgiram com o objetivo de conferir aos elementos a forma pretendida e ao mesmo tempo conferir-lhes melhores propriedades mecânicas, melhorando especialmente a tensão de cedência.

Outro tipo de tratamentos efetuados ao aço são os tratamentos térmicos, que têm como finalidade a alteração das características mecânicas dos aços por variação controlada de temperatura. Os quatro tipos de tratamentos térmicos mais utilizados são: Recozimento, normalização, têmpera e revenido.

O aço com a designação “Tempcore” é o aço atualmente utilizado para a produção de varões de aço em Portugal. Este tipo de aço resulta de um método de produção semelhante à produção do aço natural que era produzido anteriormente, somente com uma pequena diferença que ocorre no final da laminagem.

Em termos de legislação relacionada com o varão de aço para construção, pode-se referir que os princípios pelos quais se seguem os documentos legais em vigor, apresentam no geral, exigências semelhantes, tendo somente algumas diferenças na definição de certas características, como a extensão na rotura. Apesar da existência de mais do que um documento normativo, atualmente, o documento aplicável legalmente é o REBAP.

Verificou-se que, de modo a que as estruturas de betão apresentem um nível aceitável de segurança durante o seu período de vida útil, a ligação entre o projeto e a execução do mesmo deve respeitar as condições impostas pela Norma NP EN 13670. Esta Norma especifica um conjunto de requisitos técnicos normalizados para a execução das estruturas de betão, estabelecendo uma série de verificações a incluir no projeto de execução.

As armaduras destinam-se a serem integradas no betão com a finalidade de absorver parte das cargas a que o elemento vai ficar sujeito. É importante respeitar os diâmetros dos varões e as posições indicadas no projeto, para além de se garantir também uma perfeita amarração dos varões e espaçadores.

Referências Bibliográficas e Bibliografia

Publicações:

- CHIAVERINI, V. (2002): **Aços e Ferros Fundidos – 7ª edição**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais.
- COTTRELL, Alan H. (1975): **Introdução à Metalurgia - 2ª edição**. Fundação Calouste Gulbenkian.
- FILHO, Claudio Henriques Macedo Alves (2004): **Análise da Influência da Taxa de Resfriamento no Gradiente Microestrutural de Barras Laminadas a Quente Tratadas Termicamente**. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil.
- GONÇALVES, Manuel António (2006): **Os diversos tipos de aço e a sua utilização**. Instituto Superior Técnico.
- HOLLEMAN, G., Wiberg, E. (1985): **Lehrbuch der Anorganischen Chemie**. Walter de Gruyter Berlin.
- LOURENÇO, João (2012): **Estudo do comportamento de varões de aço para betão obtidos através do processo “Tempcore”**. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico.
- NETO, Egidio (2006): **Estruturas de Concreto Armado – A Proteção do Aço pelo Concreto**. VentusCore - Soluções em Concreto, Porto Alegre.
- OLIVEIRA, André (2014): **Inventário das emissões atmosféricas na indústria siderúrgica**. Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- ROBERT, J. P., LACHARTRE, A. (1999): **Pequena Crónica do Ferro e do Aço**. Edição da Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista, Traduzida da versão original editada pela OTUA – Office Technique pour l’Utilisation de l’Acier.
- RODRIGUES, P. C.; CELTIN, P.R.; SILVA, A. P.; AGUILAR, M. T. P. (1992): **Perfil de Temperaturas em Barras de Aço para Construção Civil Fabricadas Pelo Processo Tempcore**. Congresso Anual ABM, 47º, Vol.04 p. 505-521.

- SEABRA, Antera Valeriana de, (2002): **Metalurgia Geral Volume II - 3ª edição.** Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- SEABRA, A. V.; LOUREIRO, A. (1981): **Curso de Tratamentos Térmicos dos Aços, Vols. 1 e 2.** Ordem dos Engenheiros.
- SIMON, P.; ECONOMOPOULOS, M.; NILLES, P. (1984): **Tempcore: A new Process for the production of High-Quality Reinforcing Bars, Iron and Steel Engineering**, p. 53-57
- SOMAYAJI, S. (2001): **Civil Engineering Materials - 2nd edition.** Prentice Hall
- TAYLOR, G. D. (2000): **Materials in Construction: an introduction - 3rd edition.** Pearson Education Limited, Longman.
- TRIGO, Carlos; NEVES DA SILVA, A. (2009): **Manual prático de armaduras.** AECOPS, Lisboa, ISBN: 978-972-8197-16-2.

Endereços na Internet:

- <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/aco/siderurgia-no-mundo--introducao.asp> (2009)
- <http://ciencia.hsw.uol.com.br/ferro-e-o-aco4.htm> (2014)
- http://www.timoteo.cefetmg.br/site/sobre/cursos/quimica/repositorio/artigos/arq/Processo_do_Alto_Forno.pdf (2003)
- <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAe9pAAK/forno-eletrico-a-arco> (2011)
- http://portal.iefp.pt/xeobd/attachfileu.jsp?look_parentBoui=18679750&att_display=n&att_download=y (2000)
- <http://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840793/LOM3004/Aula9CM.pdf> (2008)
- <http://web.ist.utl.pt/~L52491/4ano/ep/material-apoio/slides/Cap15.pdf> (2012)
- <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAe4QoAl/processos-quimicos-na-industria-siderurgica> (2011)
- <http://paginas.fe.up.pt/~falves/DiagramaFeC.pdf> (2005)
- <http://www.cool-haven.com/blog/?p=572> (2014)

- <https://www.ua.pt/decivil/readobject.aspx?obj=22055> (2012)
- <http://www.dre.pt>
- <http://www.ctori.com.br/>
- <http://www.jacp.com.br>
- <http://www.fercimcal.com.br>
- <http://www.worldsteel.org/>
- <http://www.issb.co.uk/>
- <http://www.chagas.pt/>
- <http://www.rebarpricing.com>
- <http://www.eurofer.org/>
- www.ine.pt/

Documentos Normativos:

- Decreto-lei n.º301/2007 de 23 de Agosto.
- Decreto-lei n.º349-C/83, de 30 de Julho, Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado.
- Decreto-lei n.º390/2007 de 10 de Dezembro.
- Documentos de Classificação LNEC:
 - E449 – 1998 – varões de aço A400 NR para armaduras de betão armado – Características, ensaios e marcação.
 - E450 – 1998 – varões de aço A500 NR para armaduras de betão armado – Características, ensaios e marcação.
 - E455 – 2002 – varões de aço A400 NR de ductilidade especial para armaduras de betão armado – Características, ensaios e marcação.
 - E456 – 2000 – varões de aço A500 ER para armaduras de betão armado – Características, ensaios e marcação.
 - E460 – 2002 – varões de aço A500 NR de ductilidade especial para armaduras de betão armado – Características, ensaios e marcação.
 - E469 – 2006 - Espaçadores para armaduras de betão armado

- ISO 15630-1:2002 – Steel for reinforcement and prestressing of concrete – Test methods – Part 1: Reinforcing bars, wire rod and wire
- LDC 53, de 17 de Maio de 2012, Lista de Documentos de Classificação, LNEC
- NP EN 1992-1-1:2010, Projecto de estruturas de betão – Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios
- NP EN 13670:2011, Execução de estruturas de betão.
- NP EN 1990:2009, Bases para o projecto de estruturas
- NP EN ISO 9001:2008, Sistemas de gestão da qualidade, Requisitos
- Portaria nº 146/2006 de 20 de Fevereiro.
- prEN 10080:2005, Steel for the reinforcement of concrete – Weldable reinforcing steel – General.