

projecto de  
estruturas metálicas  
eurocódigo 3,  
***parte 1-9 FADIGA***

A.J.Reis



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

Seminário **Eurocódigos Estruturais: o início da sua aplicação em Portugal**

LISBOA • **LNEC** • 17 a 19 de Maio de 2010

# Norma Portuguesa

---

NP  
EN 1993-1-9  
2009

**Eurocódigo 3: Projecto de estruturas de aço**  
**Parte 1-9: Fadiga**

Eurocode 3: Calcul des structures en acier  
Partie 1-9: Fatigue

Eurocode 3: Design of steel structures  
Part 1-9: Fatigue

**1 Generalidades..**

**2 Requisitos básicos e métodos ..**

**3 Métodos de verificação...**

**4 Tensões resultantes das acções de fadiga...**

**5 Cálculo das tensões ...**

**6 Cálculo dos intervalos de tensão...**

**7 Resistência à fadiga .....**

**8 Verificação em relação à fadiga .....**

**Anexo A (normativo) Determinação dos parâmetros do carregamento de fadiga e dos formatos de verificação .....**

**Anexo B (normativo) Resistência à fadiga em função da tensão geométrica (na zona termicamente afectada) .....**

**Anexo Nacional NA ...**

NP EN 1993-1-9

## Requisitos básicos e

(6) As acções de fadiga são determinadas de acordo com os requisitos da verificação em relação à fadiga. São diferentes das acções para a verificação em relação ao estado limite último e ao estado limite de utilização.

*NOTA: A ocorrência de qualquer fenda por fadiga no decurso do período de utilização não significa, necessariamente, o fim desse período. As fendas deverão ser reparadas com especial cuidado de forma a evitar a introdução de condições de entalhe mais nocivas.*

## Definição da acção de Fadiga : EN 1991

EXEMPLO:

Modelos de Carga de Fadiga em pontes EN 1991-2

## **Anexo Nacional NA**

### **NA.3.2 – Informações gerais**

#### **a) Dispensa de verificação à fadiga**

### **DISPENSA DA VERIFICAÇÃO À FADIGA**

Estruturas de edifícios desde que não sujeitas a acções dinâmicas induzidas por:

- equipamentos mecânicos
- vibrações significativas devidas à acção do vento

Ref. CIDEC



Ref. CIDEC

NECESSIDADE DE VERIFICAÇÃO À FADIGA



Proj. GRID



Ref. CIDEC



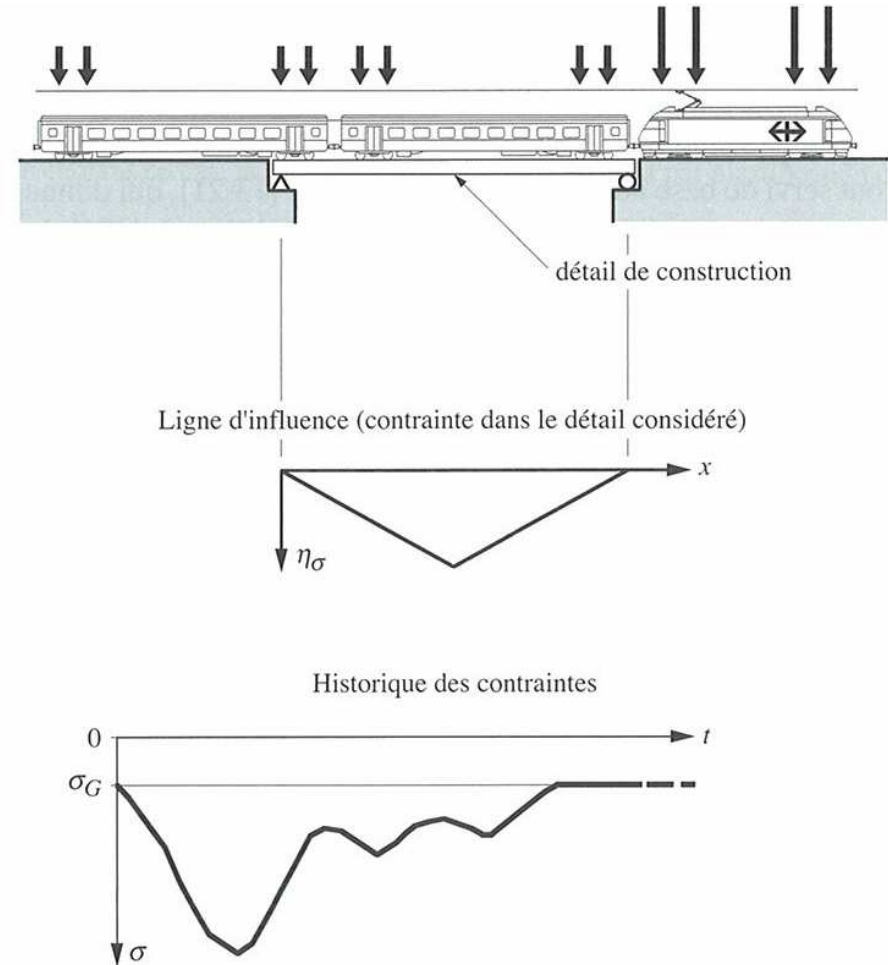
Proj. GRID.

# FADIGA: CONCEITOS BÁSICOS

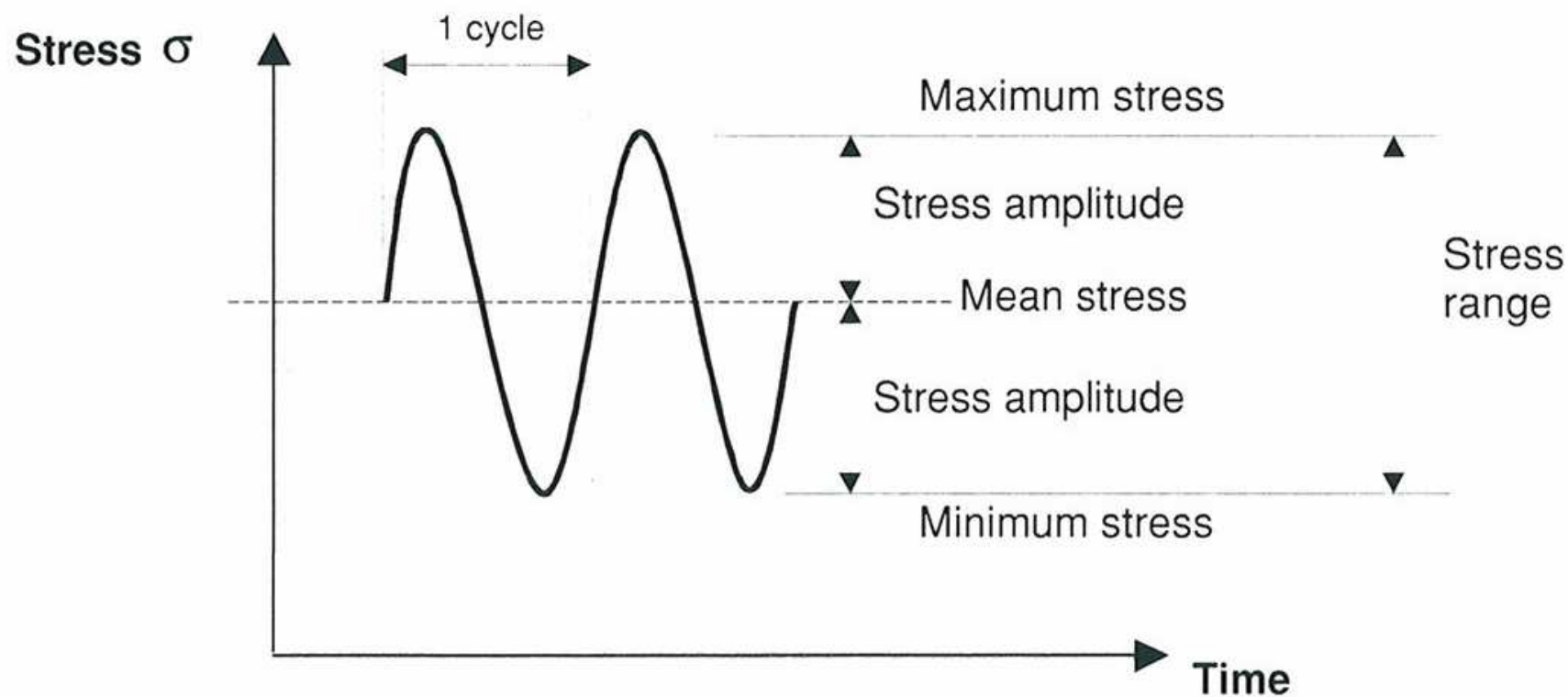
Fadiga – iniciação e propagação de fendas num elemento estrutural provocado por flutuação de tensão



Ref. Foto SETRA



Ref.M. Hirt et al.Construction Métallique EPFL

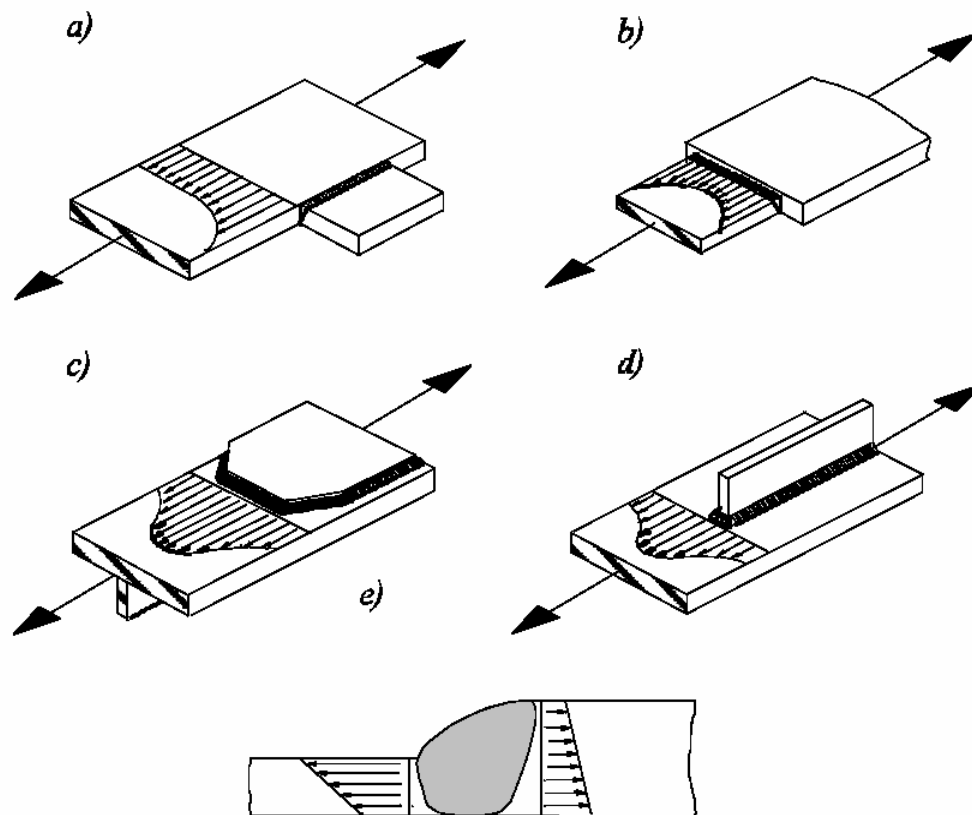
**Amplitude de tensão, intervalo de tensão, tensão média e ciclos de tensão**

Ref. ECCS "A Guideline for Fatigue Design", 2000

A iniciação e propagação de fendas de fadiga ocorre a partir de pontos de concentração de tensão e defeitos .A tenacidade do material ( resistência à propagação de fissuras ) é essencial para evitar uma rotura frágil.

Rotura frágil- NP EN 1993-1-10-  
Especificação da tenacidade dos aços  
e das propriedades através da  
espessura.

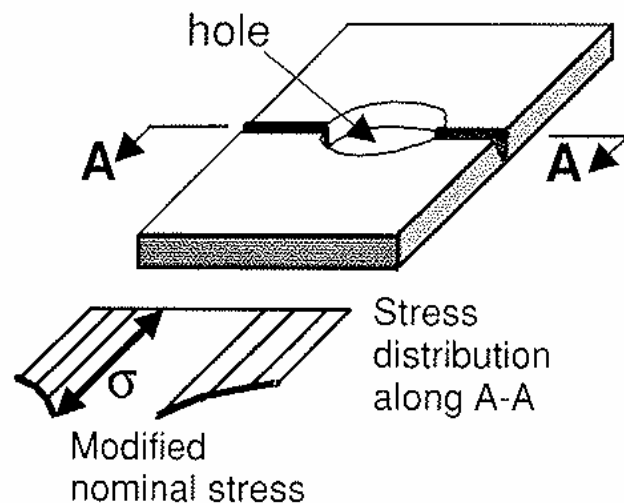
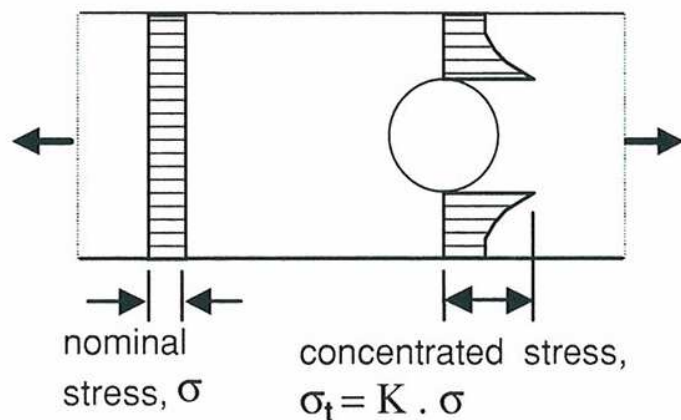
Ex. S355J2, S355k2, S355N,  
S355NL,S355M, S355ML



Fadiga - NP EN 1993-1-9

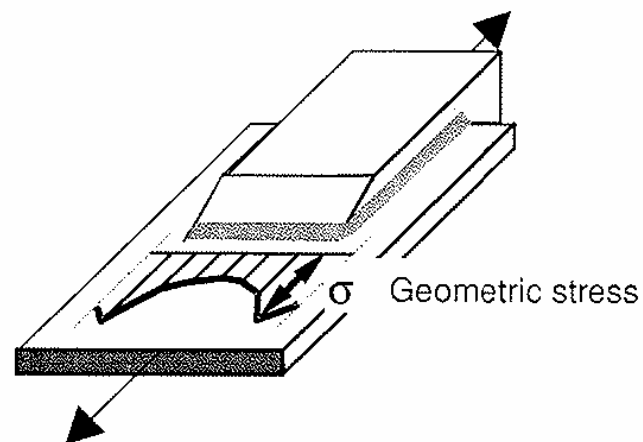
Adapt. daRef. ECCS “ A Guideline for Fatigue Design”, 2000

## Tensão nominal, tensão nominal modificada e tensão geométrica



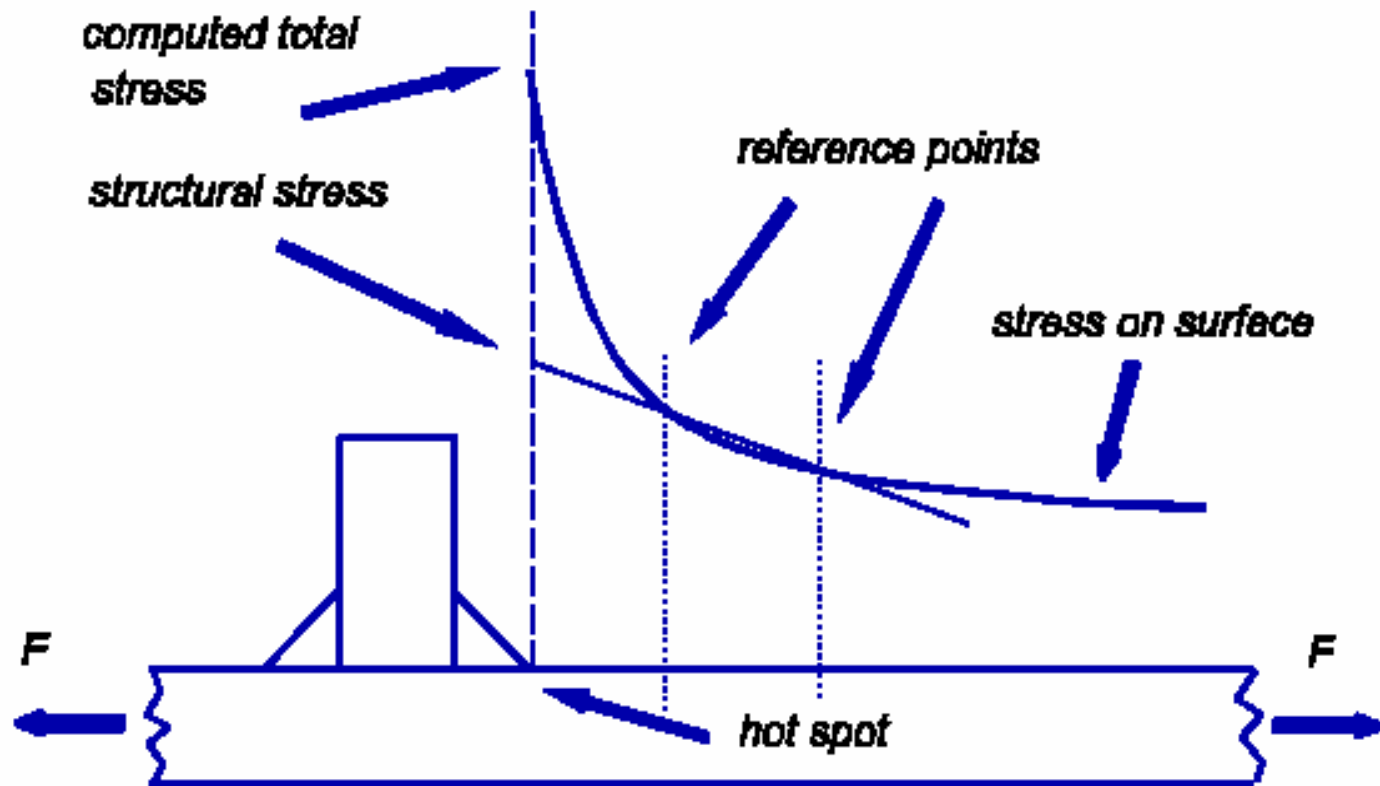
Tensão nominal modificada – a partir de factores de concentração de tensão k

Tensão geométrica - FEM



Ref. ECCS "A Guideline for Fatigue Design", 2000

# Cálculo da « tensão geométrica » $\Delta\sigma$ (HOT SPOT)



*Ref. J. Raoul, Setra,  
Source IIW*

A.J.Reis<sub>11</sub>

# Métodos de avaliação da fadiga

NP EN 1993-1-9

## 1.3.1.2 tensão nominal

Tensão no material base ou numa soldadura adjacente à localização potencial de uma fenda, calculada pela teoria elástica excluindo qualquer efeito de concentração de tensões.

*NOTA: A tensão nominal como definida na presente Norma pode ser uma tensão normal, uma tensão de corte, uma tensão principal ou uma tensão equivalente.*

## 1.3.1.3 tensão nominal modificada

Tensão nominal majorada por um factor apropriado de concentração das tensões  $k_f$ , que permite ter em conta uma descontinuidade geométrica que não tenha sido considerada na classificação de determinado pormenor construtivo.

## 1.3.1.4 tensão geométrica

tensão na zona termicamente afectada

Tensão principal máxima no material base adjacente à concordância do cordão de soldadura, tendo em conta os efeitos da concentração de tensões devidos à geometria global de determinado pormenor construtivo.

*NOTA: Não é necessário considerar os efeitos da concentração local de tensões, resultantes por exemplo do cordão de soldadura (que já estão incluídos nas categorias de pormenores do Anexo B).*

Hot spot stress range

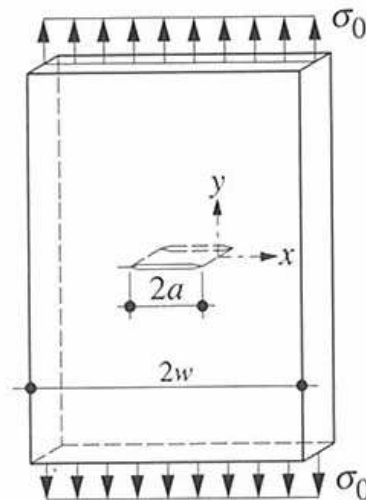
# Mecânica da Fractura : Fundamentos

## Factor de intensidade de tensão K e Factor de Correção Y

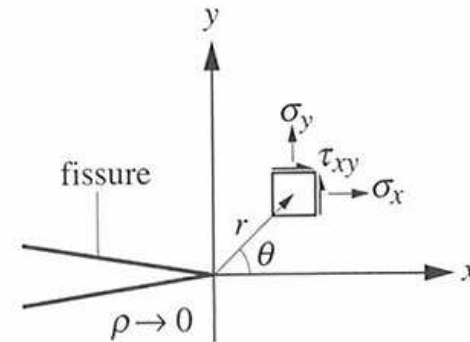
Caso base: placa de largura infinita com uma fissura de largura  $2a$  submetida a uma tensão uniforme,  $Y = 1$

$$K = Y \sigma_0 \sqrt{\pi a}$$

a- dimensão determinante da fissura na placa

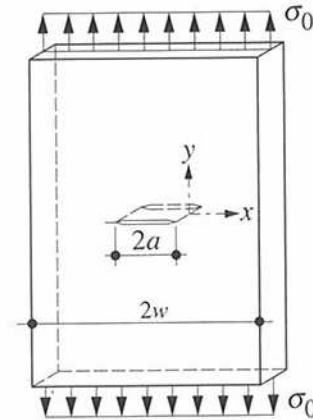


$K$  (  $\text{Nmm}^{-3/2}$  )

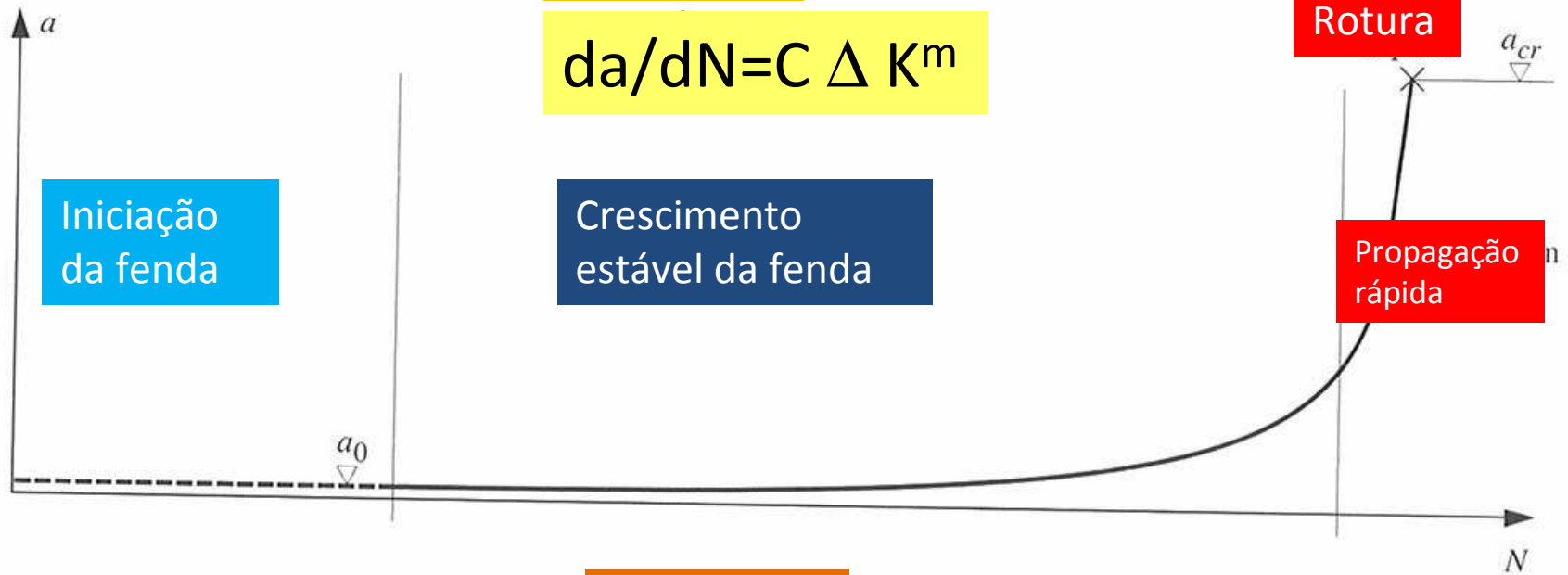


Adapt. Ref.M. Hirt et al.Construction Métallique  
EPFL, 2006

# Propagação das fissuras



Abertura da Fissura



LEI DE PARIS

$$da/dN = C \Delta K^m$$

Crescimento estável da fenda

Nº de Ciclos

Rotura

Propagação rápida

# Resistência à Fadiga

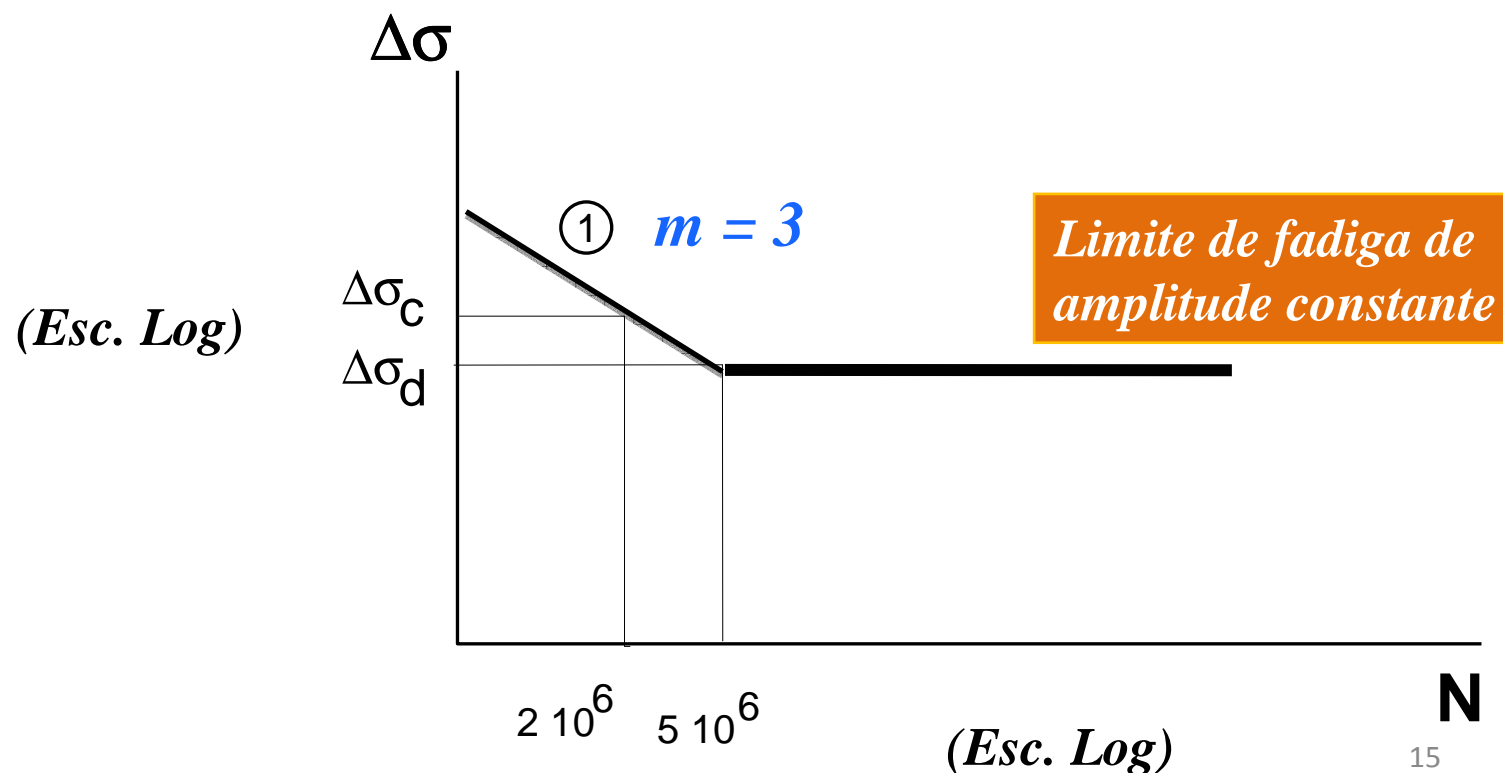
## CURVAS DE WOHLER

( *CURVA S-N* )

$$\Delta\sigma^m \cdot N = Cte$$

Notação:  $\text{Log} (\log \text{ nep. }) = \ln$

$$\text{Log } \Delta\sigma = (1/m) \log N + \text{Const}$$

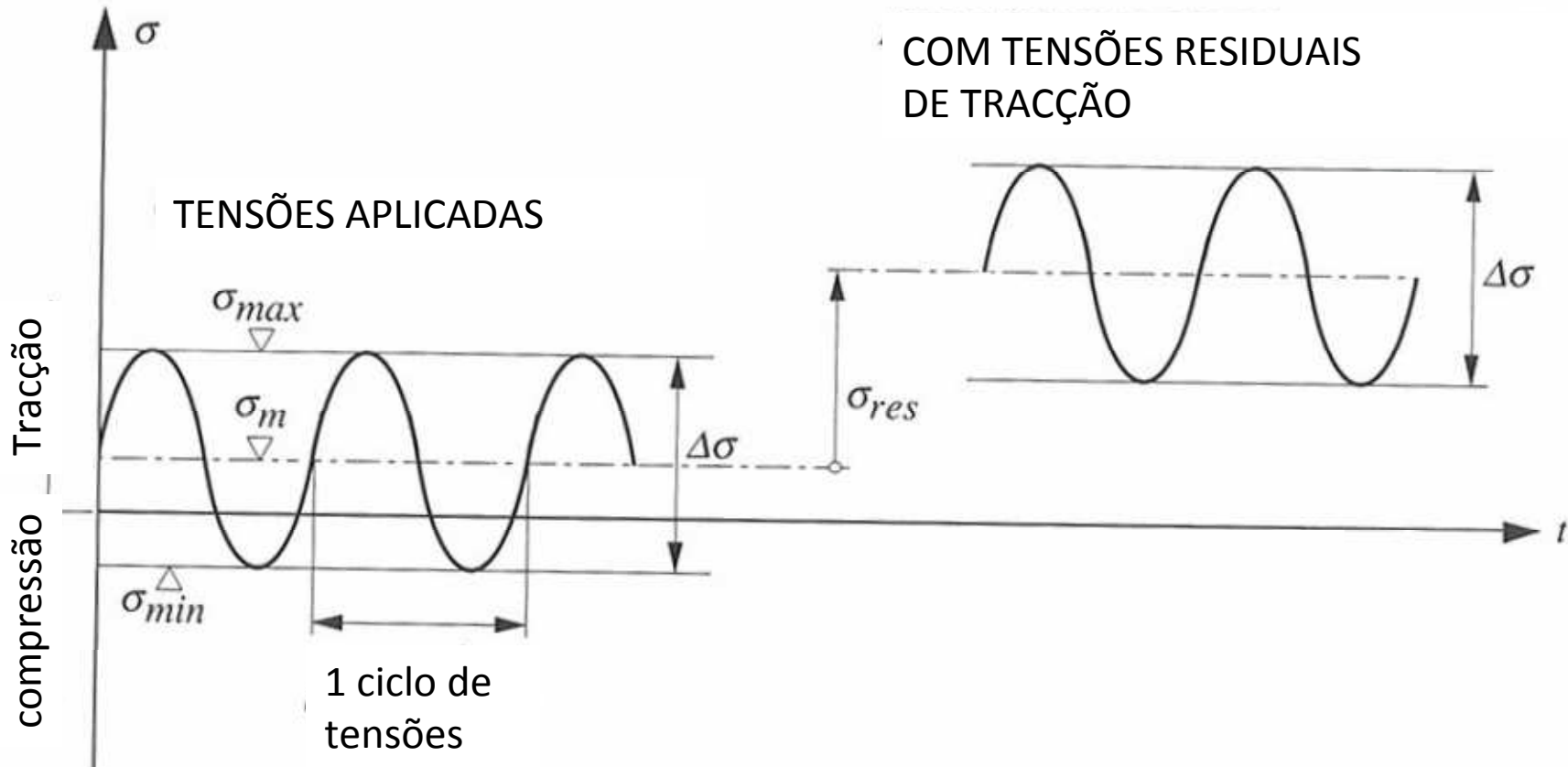


## 7 Resistência à fadiga

(1) A resistência à fadiga para as amplitudes de tensão nominal é representada por uma série de curvas  $(\log \Delta\sigma_R) - (\log N)$  e curvas  $(\log \Delta\tau_R) - (\log N)$  (curvas S-N), correspondentes a categorias de pormenores típicos. Cada categoria de pormenores é designada por um número que representa, em  $N/\text{mm}^2$ , o valor de referência  $\Delta\sigma_C$  e  $\Delta\tau_C$  da resistência à fadiga para 2 milhões de ciclos.

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_C^m 2 \times 10^6 \quad \text{com } m = 3 \text{ para } N \leq 5 \times 10^6$$

# Efeito das tensões residuais de tracção

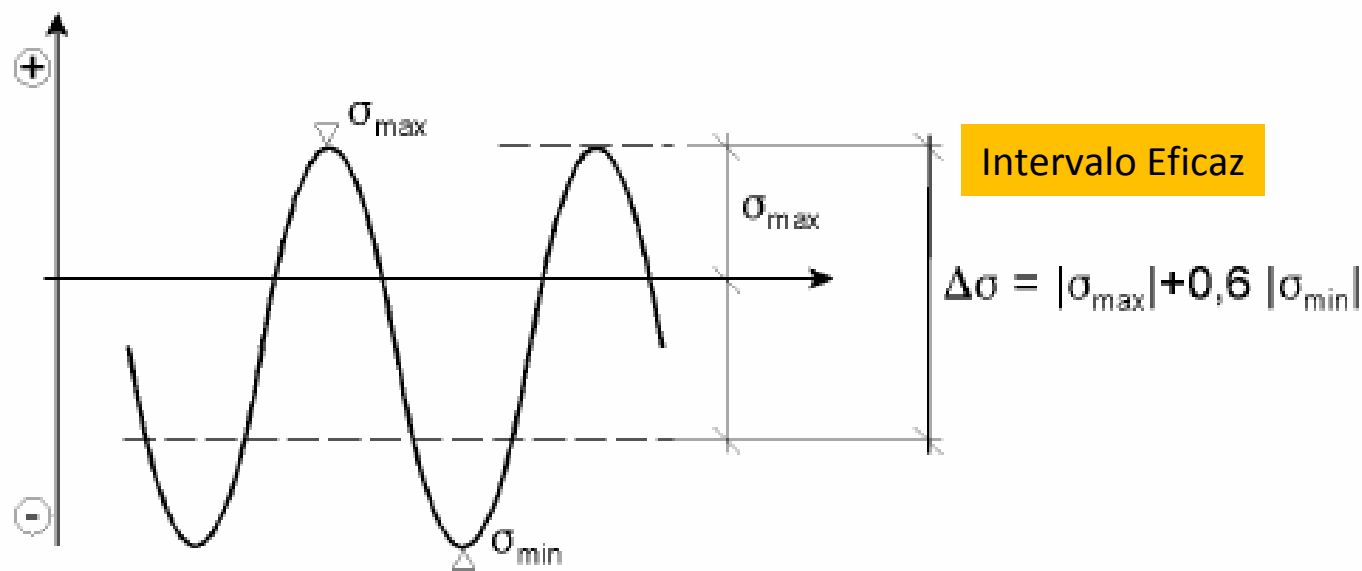


Adapt. Ref.M. Hirt et al.Construction Métallique  
EPFL, 2006

NP EN 1993-1-9

## 7.2 Modificação da resistência à fadiga

Pormenores não soldados ou soldados com relaxação de tensões em compressão : influência da tensão média, intervalo eficaz reduzido de tensões



### Secção 7.2.1

+ tracção

- compressão

(1) Nos pormenores não soldados ou soldados com relaxação de tensões, a influência da tensão média na resistência à fadiga poderá ser tida em conta pela determinação de um intervalo eficaz reduzido de tensões,  $\Delta\sigma_{E,2}$ , na verificação em relação à fadiga, quando parte ou todo o ciclo de tensões está em compressão.

NP EN 1993-1-9

Secção 7.2.2

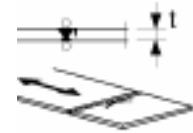
## Efeito de Escala

Devido à espessura ou outras dimensões :  
Quadros 8.1 a 8.10 - coeficiente  $k_s$

$$\Delta\sigma_{C,red} = k_s \Delta\sigma_C$$

Pormenor construtivo

efeito de  
dimensão  
para  
 $t > 25\text{mm}$ :



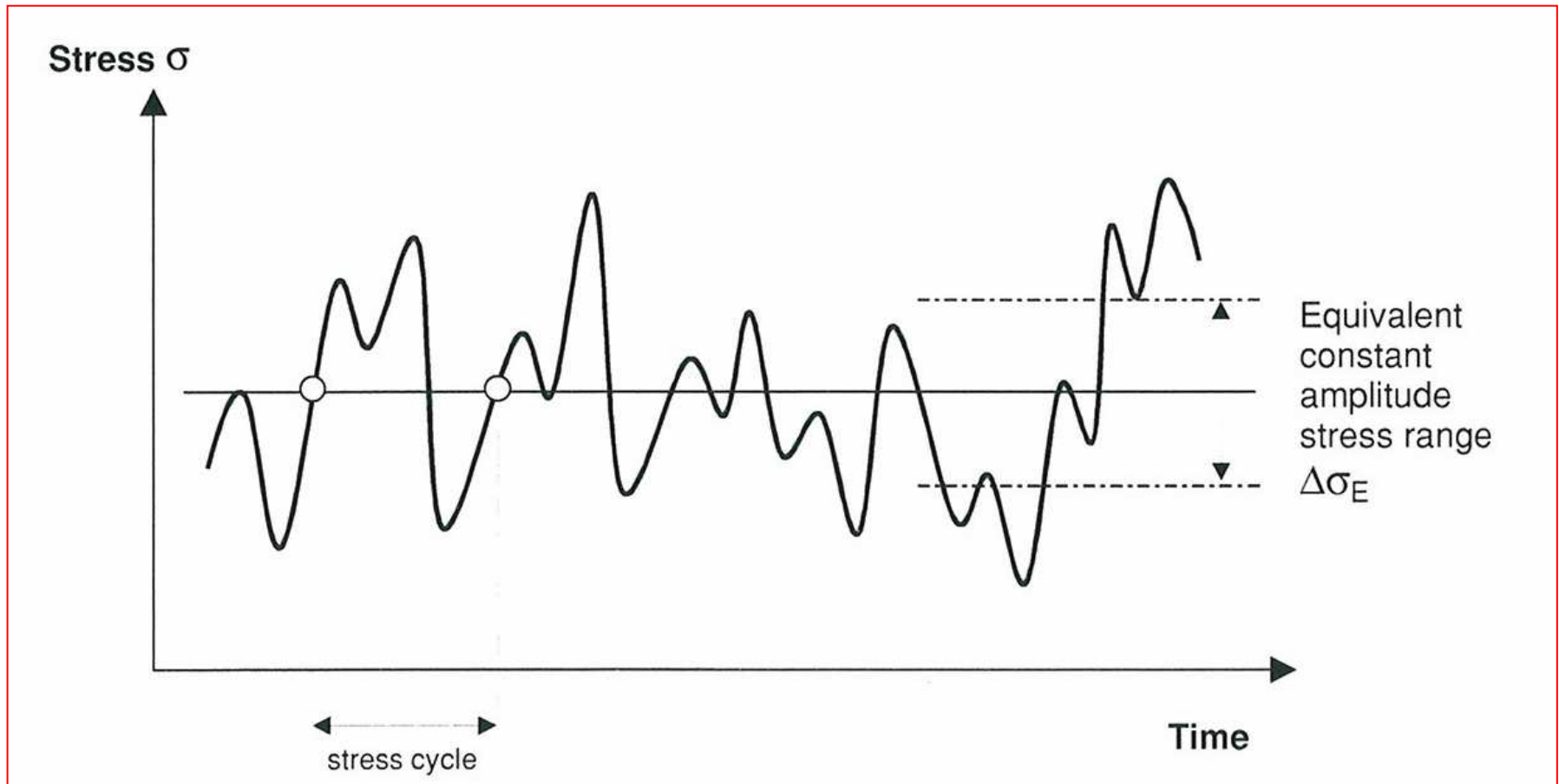
$$k_s = (25/t)^{0,2}$$

### 7.2.2 Efeito de escala

(1) O efeito de escala devido à espessura ou a outras dimensões deverá ser tido em conta como indicado nos Quadros 8.1 a 8.10. A resistência à fadiga é, então, obtida por:

$$\Delta\sigma_{C,red} = k_s \Delta\sigma_C \quad (7.1)$$

## Fadiga sob ciclos de amplitude tensão variável



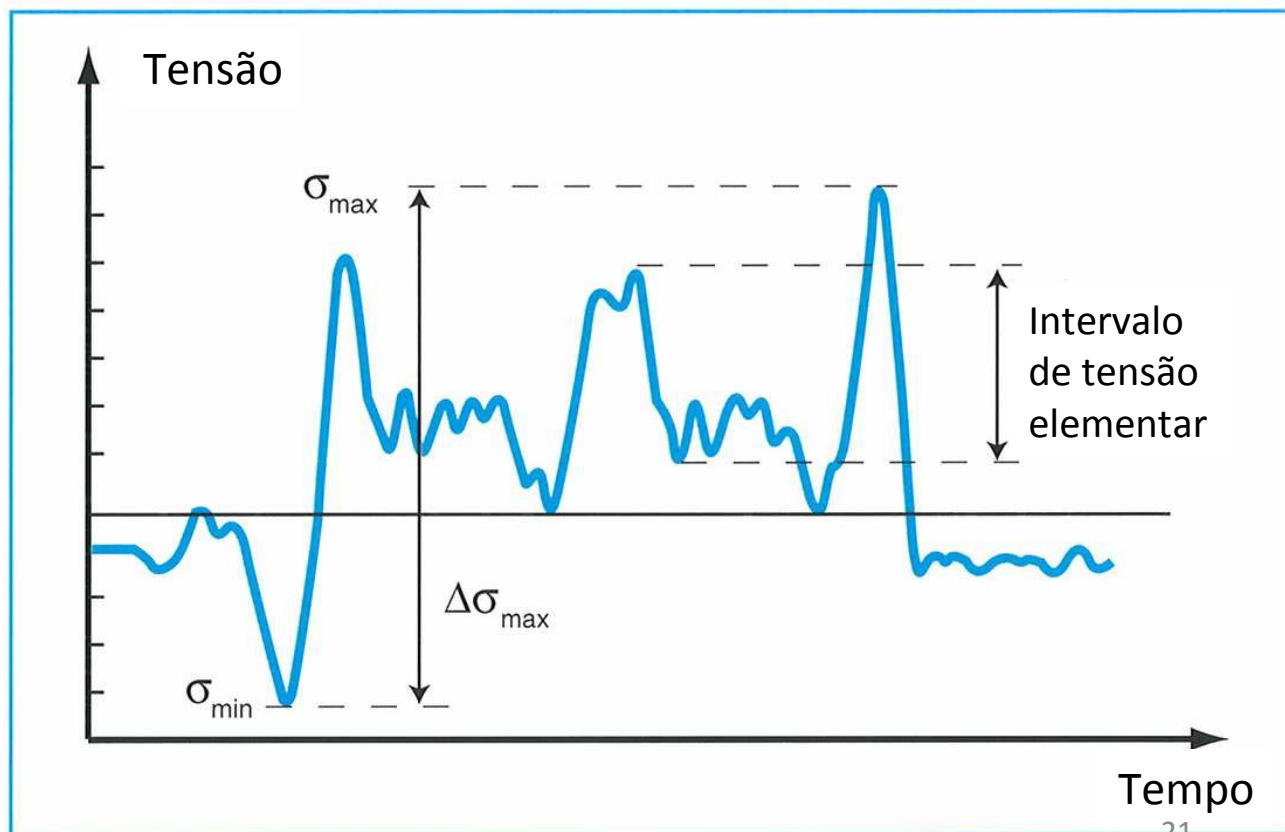
Ref. ECCS "A Guideline for Fatigue Design", 2000

## Fadiga sob ciclos de amplitude tensão variável

Métodos de contagem de ciclos ( previstos na EN 1993-1-9)

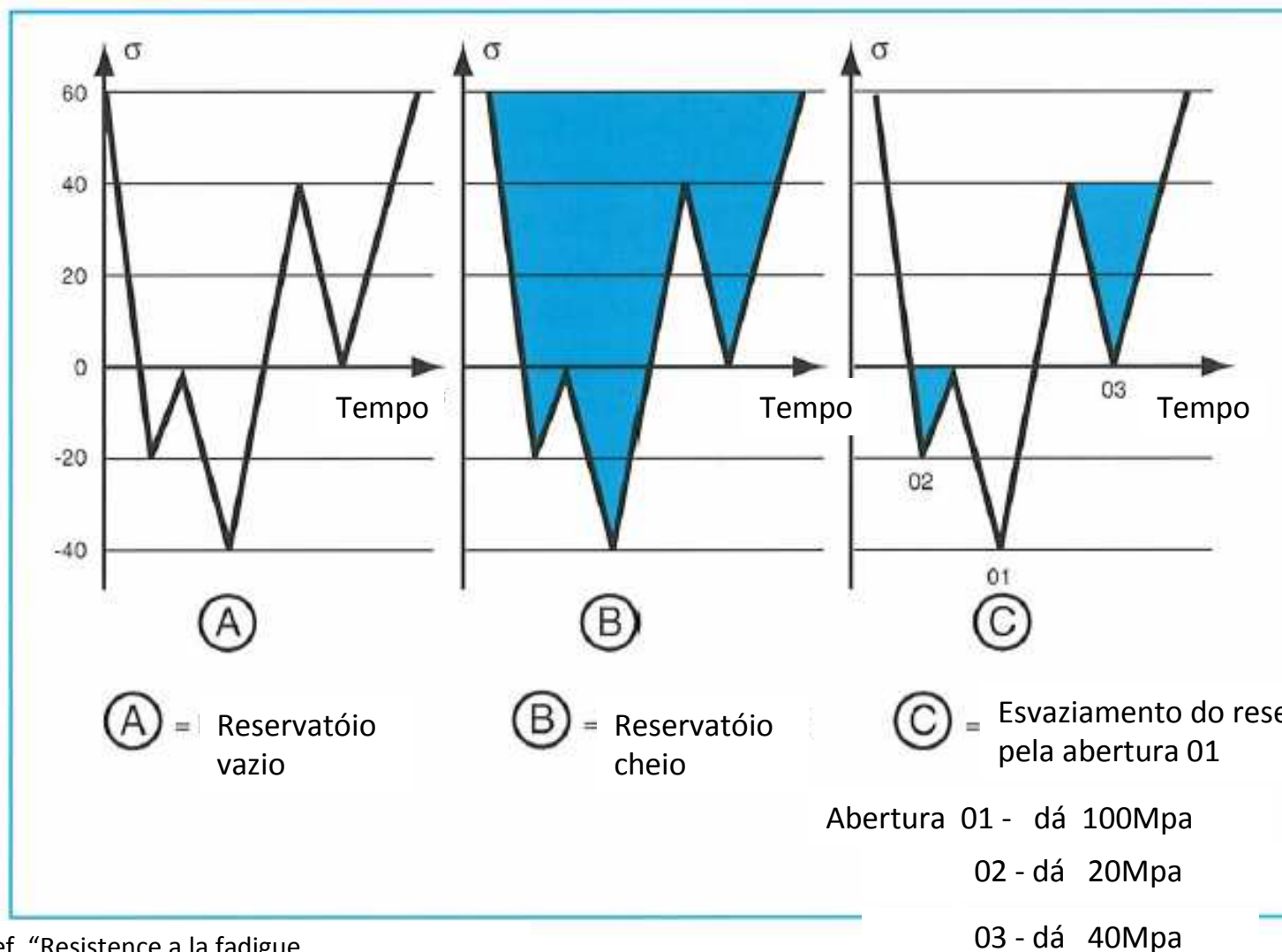
-Método do reservatório e

-Método da Gota de água



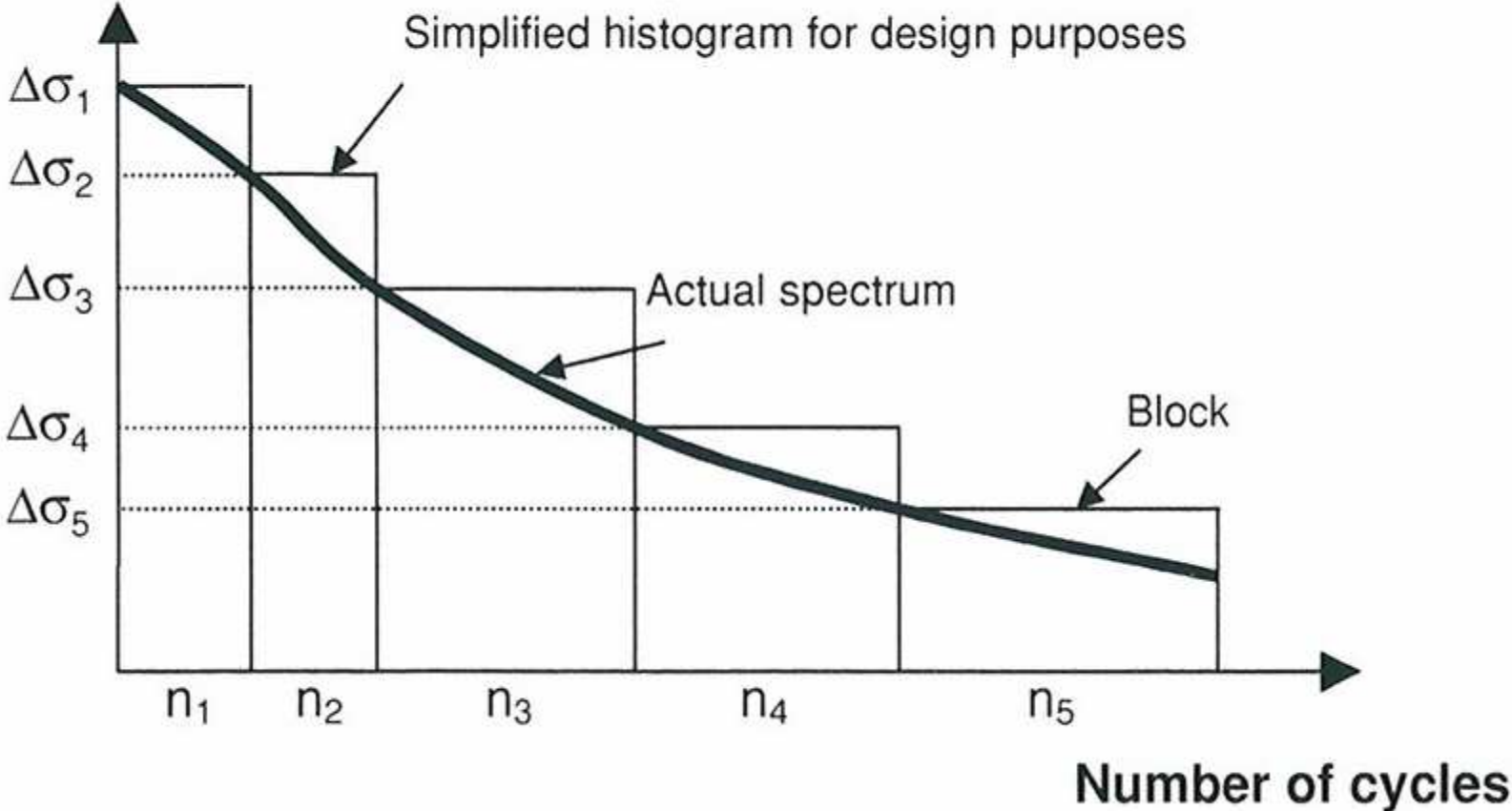
Adapt. Ref. "Resistence a la fatigue  
Guide de conception et justification"  
SETRA 1996

## Contagem de ciclos :Método do reservatório



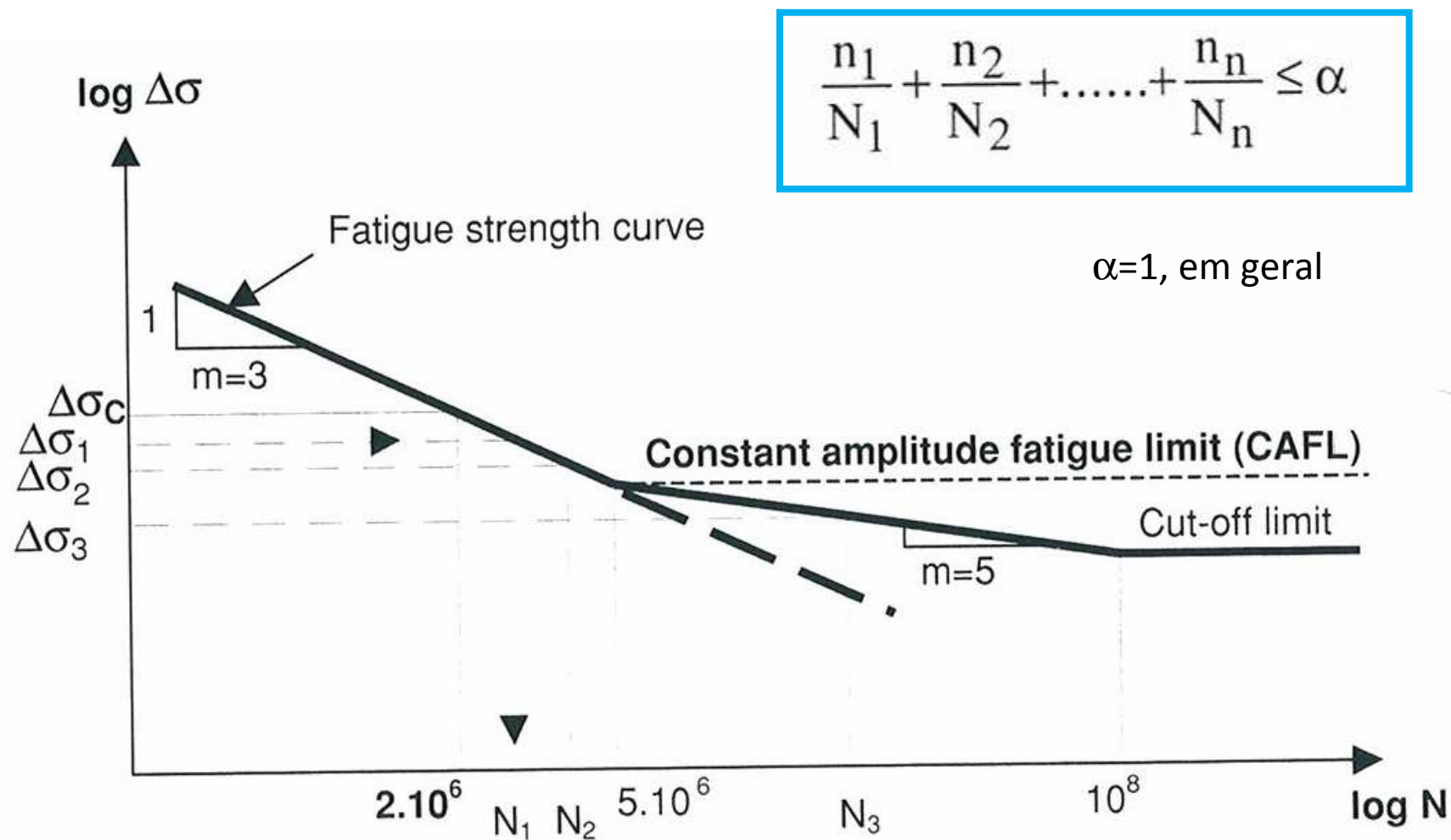
Adapt. da Ref. "Resistance a la fatigue  
Guide de conception et justification" SETRA 1996

**Stress range  $\Delta\sigma$**



Ref. ECCS " A Guideline for Fatigue Design", 2000

## Acumulação de Danos : Regra de Palmegren -Miner



# Formatos de verificação à Fadiga

1. Dano acumulado
2. Intervalo de tensões – ciclos de amplitude constante equivalente

NP EN 1993-1-9

## A.6 Formatos de verificação

(1) A avaliação da fadiga a partir do dano acumulado deverá satisfazer os seguintes critérios:

- na base do dano acumulado:

$$D_d \leq 1,0$$

- na base do intervalo de tensões:

$$\gamma_{FF} \Delta\sigma_{E,2} \leq \sqrt[m]{D_d} \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}}, \text{ em que } m = 3$$

Amplitude de tensão equivalente a  $2 \times 10^6$  de ciclos:

$$\Delta\sigma_{E2}$$

$$\Delta\sigma_{E2} = \lambda \quad \Phi \quad \Delta\sigma$$

$\lambda$  – Factor de dano equivalente

$\Phi$  – Factor dinâmico de dano equivalente

Exemplo: Pontes rodoviárias  $\Phi = 1$

Pontes ferroviárias  $\Phi = \Phi_2$

## **Anexo A**

(normativo)

### **Determinação dos parâmetros do carregamento de fadiga e dos formatos de verificação**

**A.1 Determinação dos casos de carregamento**

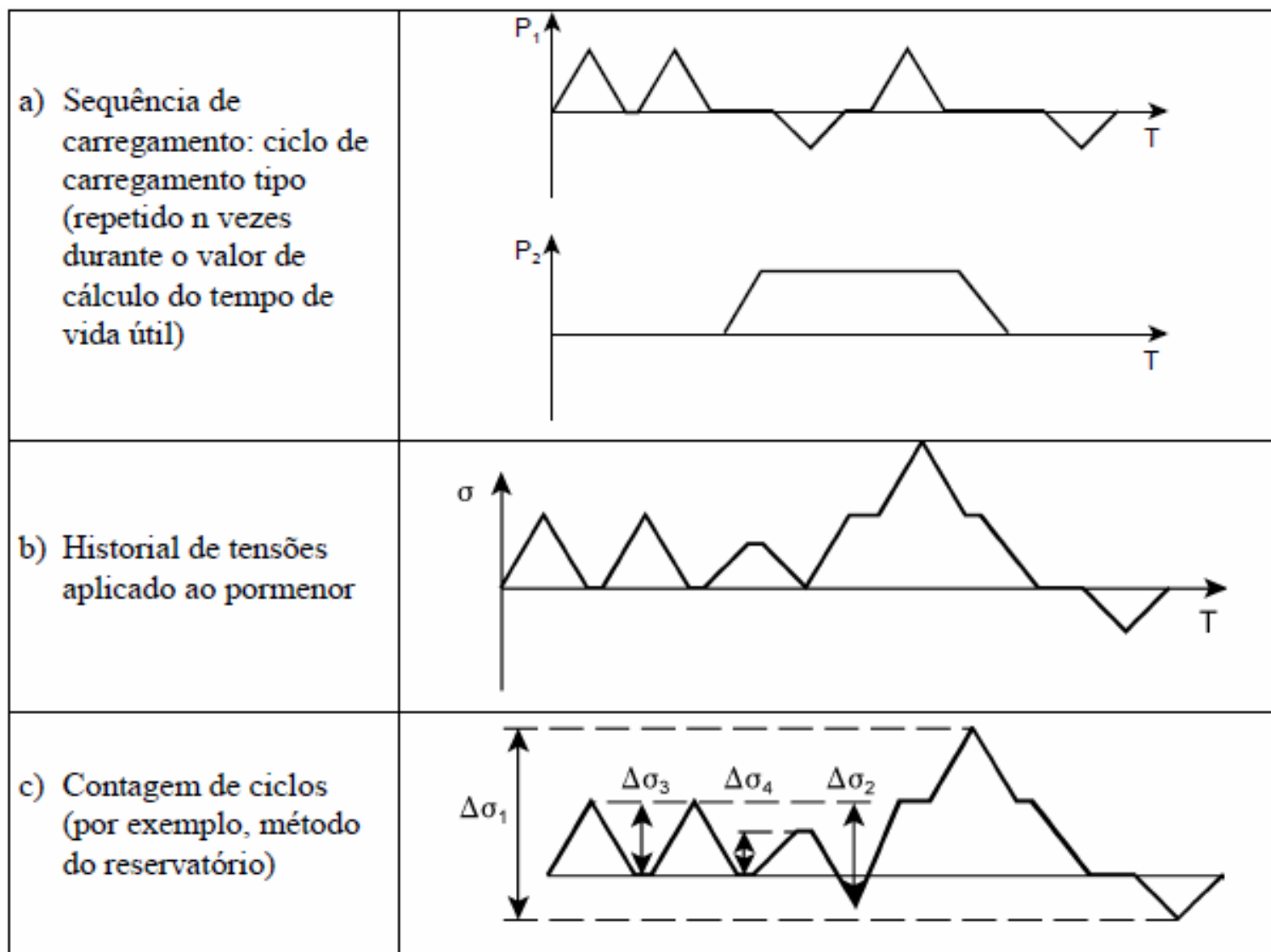
**A.2 Historial de tensões para o pormenor construtivo**

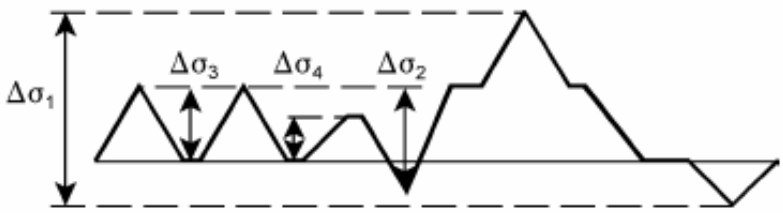
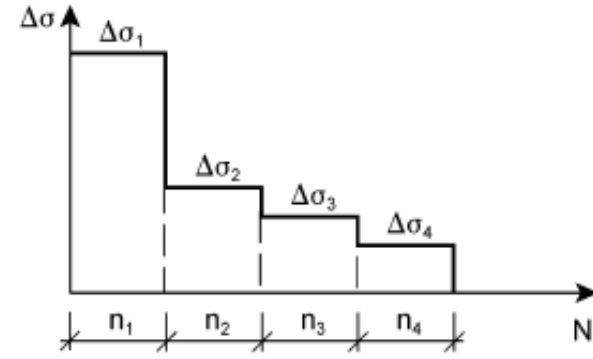
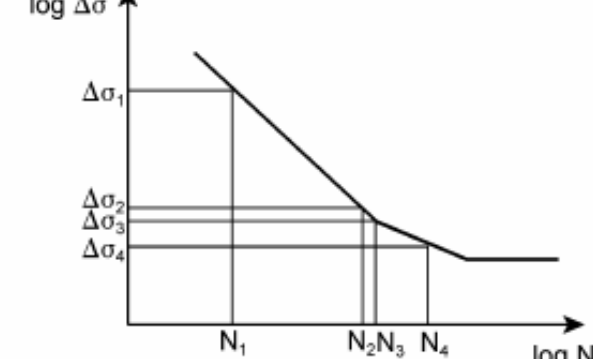
**A.3 Contagem dos ciclos**

**A.4 Espectro dos intervalos de tensão**

**A.5 Ciclos até à rotura**

**A.6 Formatos de verificação**



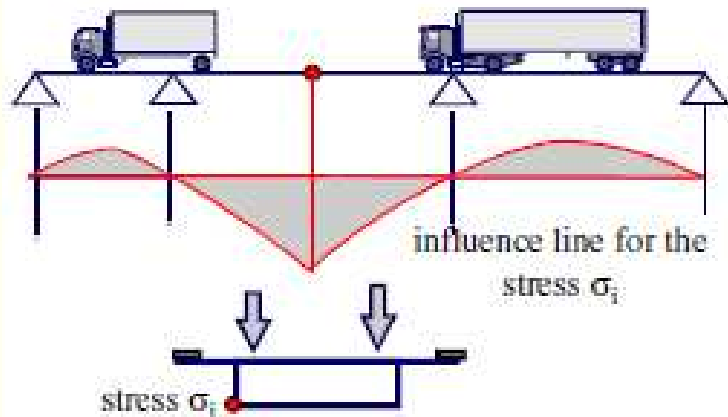
<p>c) Contagem de ciclos (por exemplo, método do reservatório)</p>	
<p>d) Espectro de intervalo de tensões</p>	
<p>e) Ciclos até à rotura</p>	
<p>f) Dano acumulado (regra de Palmgren-Miner)</p>	$\sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \frac{n_4}{N_4} \leq D_L$

NP EN 1993-1-9

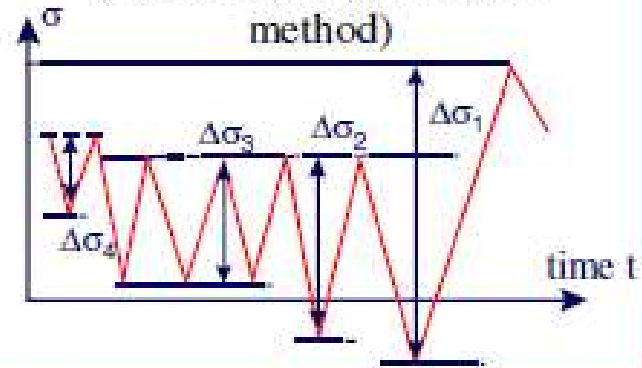
Método do dano acumulado :

Contagem de ciclos e Regra de Palmgren Miner

### traffic loading and traffic composition

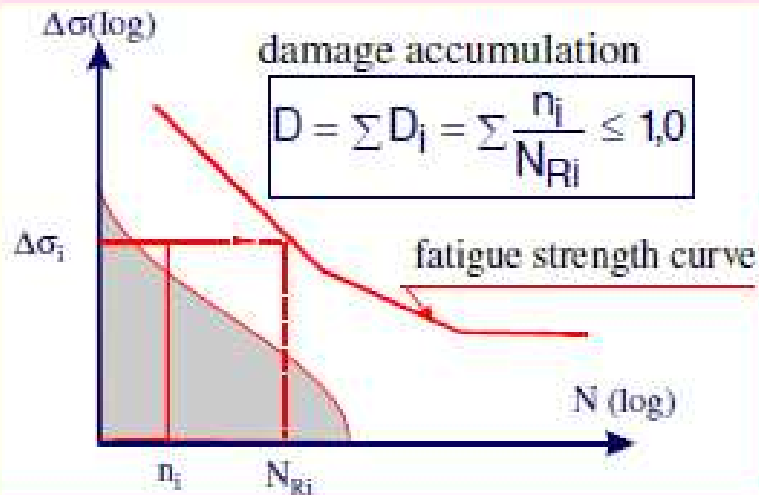


### stress history of the dynamic action effects and cycle counting (e.g. reservoir or rain flow method)

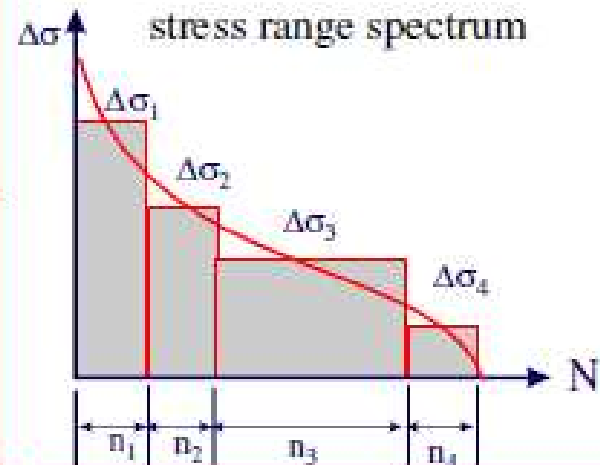


### damage accumulation

$$D = \sum D_i = \sum \frac{n_i}{N_{Ri}} \leq 1,0$$



### stress range spectrum



## 6. Cálculo dos Intervalos de Tensões

NP EN 1993-1-9

O valor de calculo do intervalo de tensões, é o correspondente a 2 milhões de ciclos , com a verificação à fadiga para :

$$\gamma_{ff} \Delta \sigma_{E,2}$$

-amplitude de tensão nominal para Pormenor,es  
Quadro 8.1 a 8.10

-amplitude de tensão nominal modificada casos não  
contemplados nos Pormenores Quadro 8.1 a 8.10

-amplitude de tensão geométrica para gradiente,  
importantes de tensões próximo de um cordão de soldadura  
– ligações Quadro B1

## 6.2 Valor de cálculo da amplitude de tensão nominal

$$\gamma_{FF} \Delta\sigma_{E,2} = \lambda_1 \times \lambda_2 \times \lambda_i \times \dots \times \lambda_n \times \Delta\sigma(\gamma_{FF} Q_k)$$

$$\gamma_{FF} \Delta\tau_{E,2} = \lambda_1 \times \lambda_2 \times \lambda_i \times \dots \times \lambda_n \times \Delta\tau(\gamma_{FF} Q_k)$$

$\Delta\sigma(\gamma_{FF} Q_k)$ ,  $\Delta\tau(\gamma_{FF} Q_k)$  intervalo de tensões resultantes do carregamento de fadiga especificado na EN 1991;

$\lambda_i$  factores de dano equivalente em função dos espectros como especificados nas Partes apropriadas da EN 1993.

(2) Na falta de dados adequados para  $\lambda_i$ , o valor de cálculo da amplitude de tensão nominal poderá ser determinado utilizando os princípios estabelecidos no Anexo A.

### 6.3 Valor de cálculo da amplitude de tensão nominal modificada

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2} = k_f \times \lambda_1 \times \lambda_2 \times \lambda_3 \times \dots \times \lambda_n \times \Delta\sigma(\gamma_{Ff} Q_k)$$

$$\gamma_{Ff} \Delta\tau_{E,2} = k_f \times \lambda_1 \times \lambda_2 \times \lambda_3 \times \dots \times \lambda_n \times \Delta\tau(\gamma_{Ff} Q_k)$$

Factor de concentração de tensões , obtido de Manuais ou pelo MEF

$k_f$  factor de concentração de tensões que traduz uma amplificação local das tensões, relacionada com a geometria dos pormenores, não incluída na curva  $\Delta\sigma_R$ -N de referência.

## 6.4 Valor de cálculo do intervalo de tensões para ligações soldadas de secções tubulares

valor de cálculo da amplitude de tensão nominal modificada

$$\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2} = k_1 \left( \gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2}^* \right)$$

Factor de majoração de tensões , Quadros 4,1 e 4.2

$$\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2}^*$$

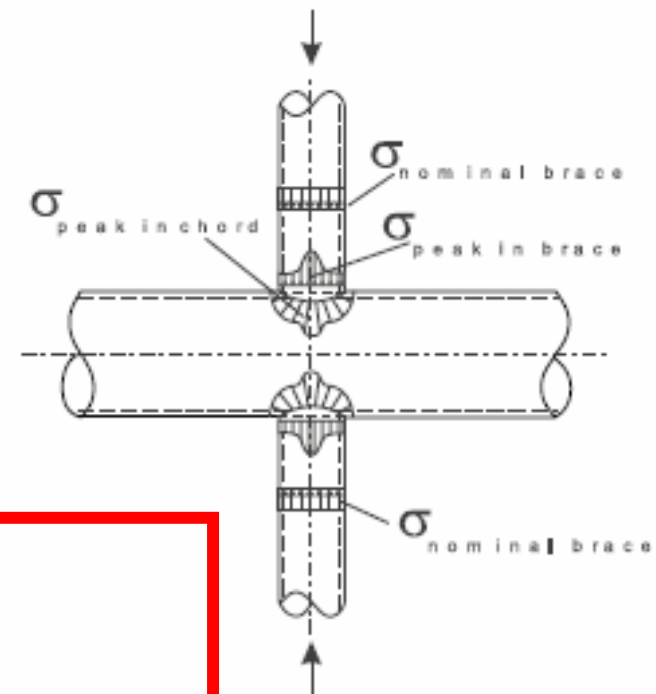
Calculado com um modelo de estrutura articulada

## 6.5 Valor de cálculo do intervalo de tensões para a tensão geométrica (na zona termicamente afectada)

$$\gamma_{Pf} \Delta \sigma_{E,2} = k_f \left( \gamma_{Pf} \Delta \sigma_{E,2}^* \right)$$

$k_f$  factor de concentração de tensões.

## Hot Spot Stress Method



## Anexo B

(normativo)

Resistência à fadiga em função da tensão geométrica  
(na zona termicamente afectada)

NP EN 1993-1-9

## 7 Resistência à fadiga

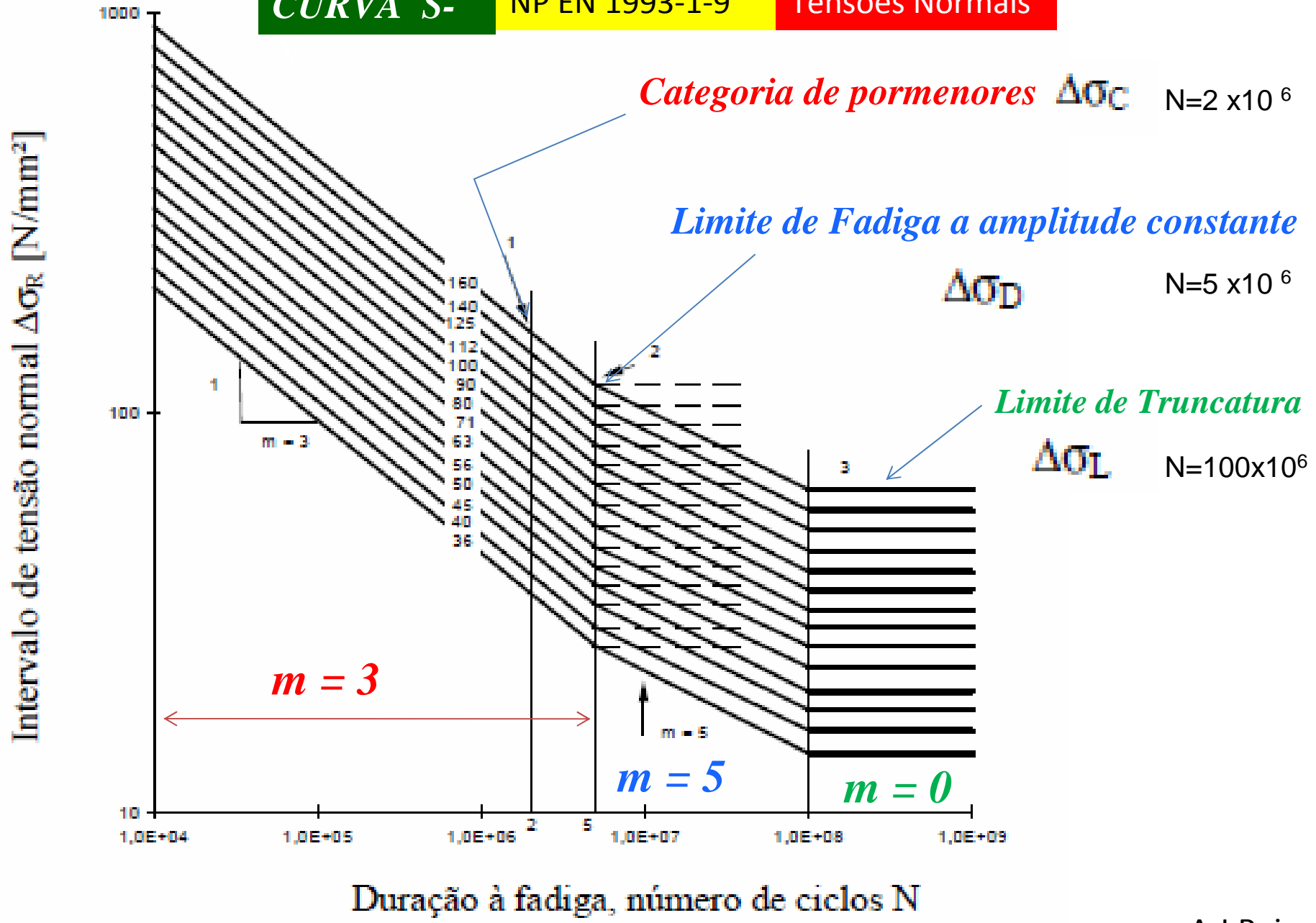
### 7.1 Generalidades

(3) Para um espectro de tensões nominais com intervalos de tensões acima e abaixo do limite de fadiga a amplitude constante,  $\Delta\sigma_D$ , a resistência à fadiga deverá ser avaliada através de curvas generalizadas de resistência à fadiga, do seguinte modo:

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_C^m 2 \times 10^6 \quad \text{com } m=3 \quad \text{para } N \leq 5 \times 10^6;$$

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_D^m 5 \times 10^6 \quad \text{com } m=5 \quad \text{para } 5 \times 10^6 \leq N \leq 10^8;$$

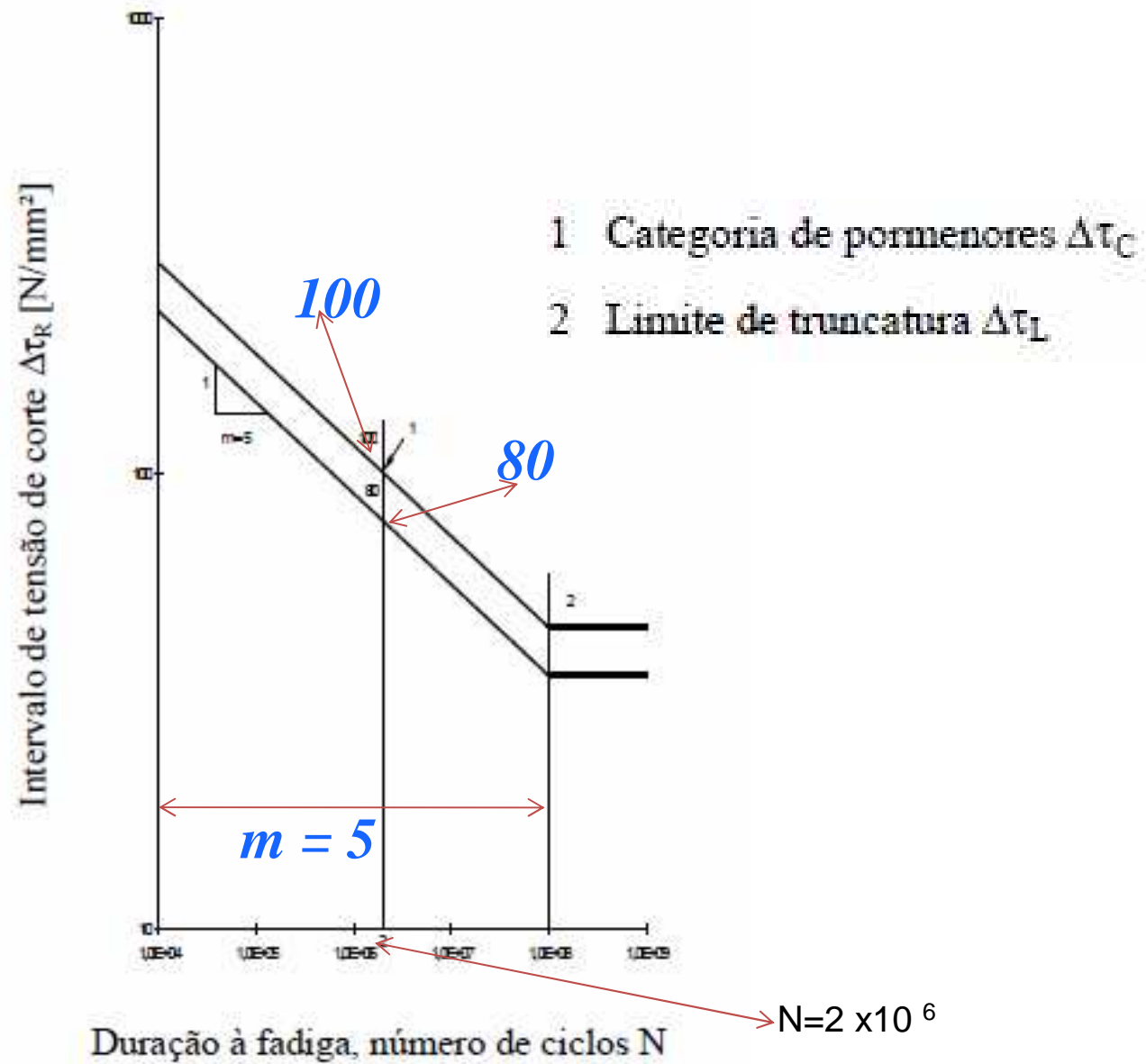
**CURVA S-** NP EN 1993-1-9 Tensões Normais




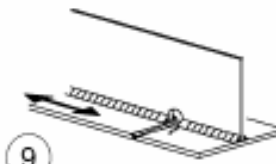
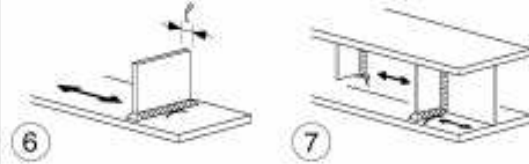
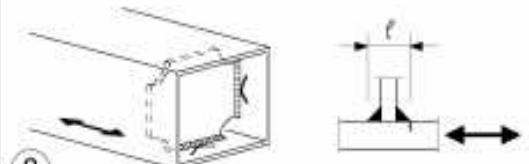
# CURVA S-N

NP EN 1993-1-9



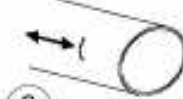


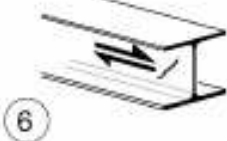

Tensões  
Tangenciais



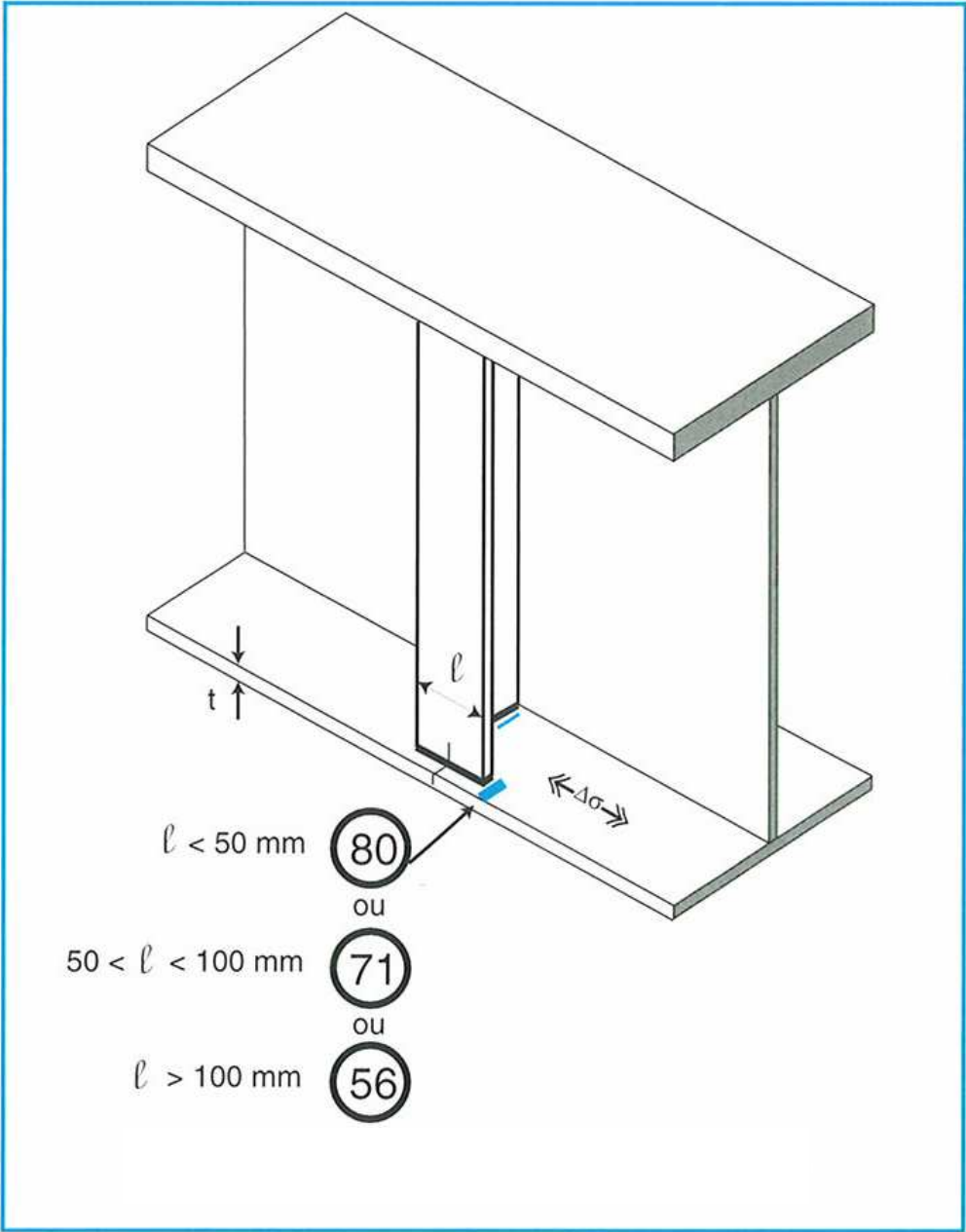
NP EN 1993-1-9

Categoria do pormenor	Pormenor construtivo	
160	<p>NOTA: A curva de resistência à fadiga associada à categoria 160 é a mais elevada. Nenhum pormenor pode atingir uma melhor resistência à fadiga seja qual for o número de ciclos.</p> 	
71		
80	$\ell \leq 50\text{mm}$	
71	$50 < \ell \leq 80\text{mm}$	

Quadro 8.1 – Elementos não soldados e uniões com ligações mecânicas

Categoria do pormenor	Pormenor construtivo	Descrição	Requisitos
160	<p>NOTA: A curva de resistência à fadiga associada à categoria 160 é a mais elevada. Nenhum pormenor pode atingir uma melhor resistência à fadiga seja qual for o número de ciclos.</p>   	<p><u>Produtos laminados ou extrudidos:</u></p> <p>1) Chapas e barras com bordos laminados.                  2) Perfis laminados com bordos laminados.                  3) Secções tubulares sem costura, rectangulares ou circulares.</p>	<p><u>Pormenores 1) a 3):</u></p> <p>Arestas vivas, imperfeições superficiais e de laminagem melhoradas por rectificação até à sua eliminação e obtenção de uma transição suave.</p>
140		<p><u>Chapas cortadas mecanicamente ou por processo autogéneo:</u></p> <p>4) Corte autogéneo ou mecânico com rectificação posterior.                  5) Corte autogéneo automático, com linhas de fusão pouco profundas e regulares ou corte autogéneo manual, com posterior eliminação de qualquer defeito de bordo.</p>	<p>4) Eliminação de todos os sinais visíveis de defeitos nos bordos. Zonas de corte são maquinadas ou rectificadas e todas as rebarbas eliminadas.                  Todas as estrias resultantes, por exemplo, de operações de rectificação, apenas podem ser paralelas às tensões.</p>
125		<p>Qualidade do corte autogéneo automático de acordo com a EN 1090.</p>	<p><u>Pormenores 4) e 5):</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Os cantos reentrantes são melhorados por meio de rectificação (inclinação <math>\leq 1/4</math>) ou a verificação é feita utilizando os factores de concentração de tensões adequados.</li> <li>- Não existem reparações por reenchimento da soldadura.</li> </ul>
100 m = 5	 	<p>6) e 7)                  Produtos laminados ou extrudidos como nos pormenores 1), 2), 3).</p>	<p><u>Pormenores 6) e 7):</u></p> <p><math>\Delta\tau</math> calculado a partir de:</p> $\tau = \frac{V S(t)}{I t}$

Para os pormenores 1 – 5 de aços resistentes às condições atmosféricas, utilizar a categoria imediatamente inferior.



Adapt. Ref. "Resistence a la fadigue  
Guide de conception et justification"  
SETRA 1996

## Verificação à Fadiga

NP EN 1993-1-9  
EN 1993-2

Sob combinações frequentes

$\Delta\sigma \leq 1,5f_y$  para os intervalos de tensões normais;

$\Delta\tau \leq 1,5f_y / \sqrt{3}$  para os intervalos de tensões de corte.

**Para a carga de fadiga**

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} \leq 1,0$$

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_C / \gamma_{Mf}} \leq 1,0$$

NP EN 1993-1-9

## Métodos de Verificação à Fadiga : secção 3

### -Método do dano controlado

Programa de inspecção e manutenção, para correcção de danos de fadiga. Aplicável sempre que existe possibilidade de redistribuição de esforços

### -Método do tempo de vida garantido

Deverá ser utilizado na caso em que a formação de uma fenda pode conduzir rapidamente á rotura desse elemento ou da estrutura

-ajuste do nível de fiabilidade : consequências da rotura e método de verificação utilizado

$$\gamma_{Mf}$$

-coeficiente parcial para a resistencia à fadiga

NP EN 1993-1-9

Quadro 3.1 – Valores recomendados para o coeficiente parcial para a resistência à fadiga

<i>Método de verificação</i>	<i>Consequências da rotura</i>	
	<i>Consequências pouco importantes</i>	<i>Consequências importantes</i>
<i>Dano controlado</i>	<i>1,00</i>	<i>1,15</i>
<i>Tempo de vida garantido</i>	<i>1,15</i>	<i>1,35</i>

# Verificação à Fadiga

Factor  
parcial para  
a carga= 1,0

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} \leq 1,0$$

Categoria  
da detalhe

NP EN 1993-1-9

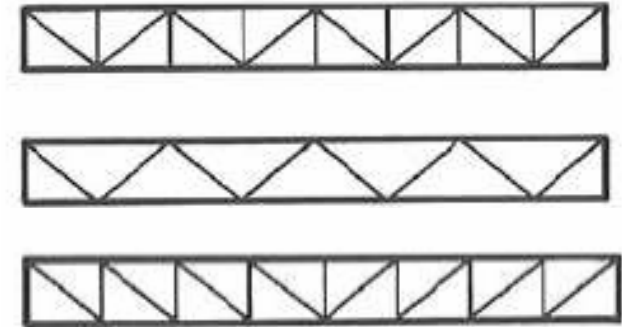
Quadro 3.1 – Valores recomendados para o coeficiente parcial para a resistência à fadiga

<i>Método de verificação</i>	<i>Consequências da rotura</i>	
	<i>Consequências pouco importantes</i>	<i>Consequências importantes</i>
<i>Dano controlado</i>	1,00	1,15
<i>Tempo de vida garantido</i>	1,15	1,35

Vigas reticuladas (trianguladas /treliças)

Efeito de momentos secundários

TUBOS CHS



Quadro 4.1 – Factores  $k_1$  para secções tubulares circulares com carregamento no plano

Tipo de ligação		Cordas	Verticais	Diagonais
Ligação com afastamento	Tipo K	1,5	-	1,3
	Tipo N / Tipo KT	1,5	1,8	1,4
Ligação com sobreposição	Tipo K	1,5	-	1,2
	Tipo N / Tipo KT	1,5	1,65	1,25

*NOTA 1: Para a definição dos tipos de ligação, ver a EN 1993-1-8.*

*NOTA 2: Domínios de validade dos dados geométricos:*

## Vigas reticuladas (trianguladas /treliças)

Efeito de momentos secundários TUBOS RHS

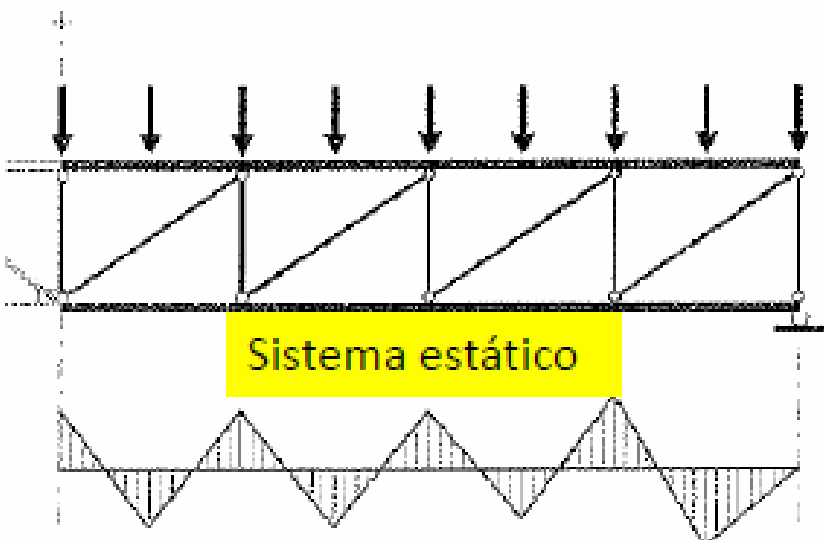
Quadro 4.2 – Factores  $k_1$  para secções tubulares rectangulares com carregamento no plano

Tipo de ligação		Cordas	Verticais	Diagonais
Ligação com afastamento	Tipo K	1,5	-	1,5
	Tipo N / Tipo KT	1,5	2,2	1,6
Ligação com sobreposição	Tipo K	1,5	-	1,3
	Tipo N / Tipo KT	1,5	2,0	1,4

*NOTA 1: Para a definição dos tipos de ligação, ver a EN 1993-1-8.*

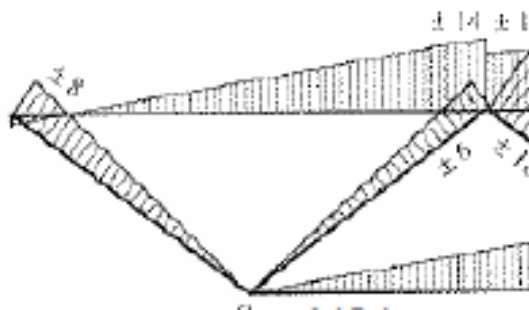
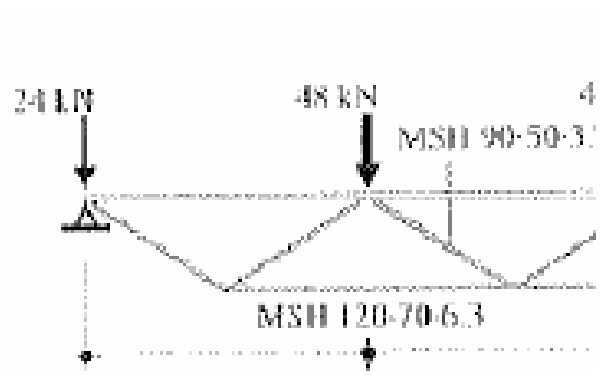
*NOTA 2: Domínios de validade dos dados geométricos:*

Efeito de momentos primários e secundários



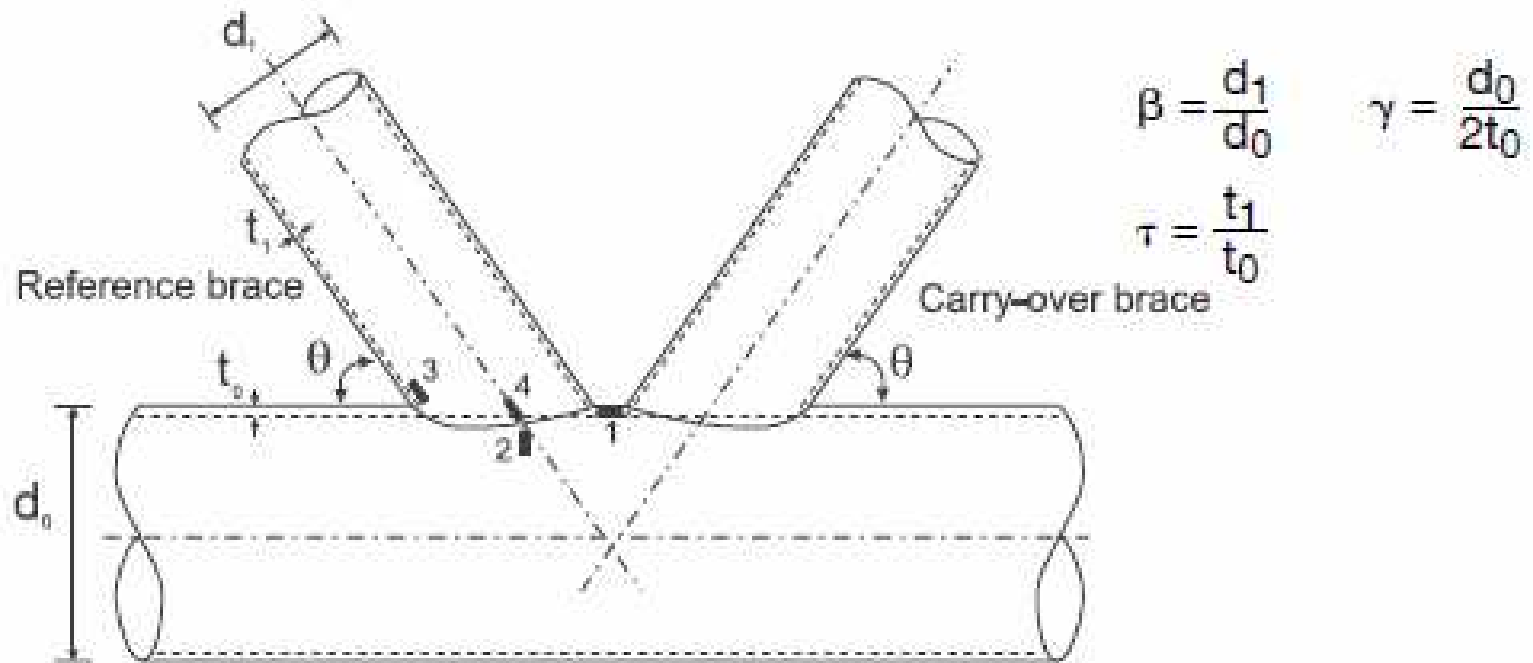
Sistema estático

Momentos flectores na corda carregada



Momentos secundários devido à rigidez dos nós

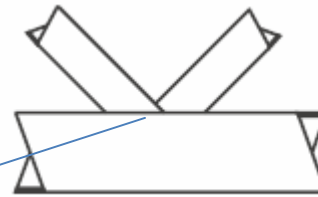
## Modelação dos nós



Adapt. a Ref. CIDEC

DESIGN GUIDE  
FOR CIRCULAR AND RECTANGULAR  
HOLLOW SECTION WELDED JOINTS  
UNDER FATIGUE LOADING

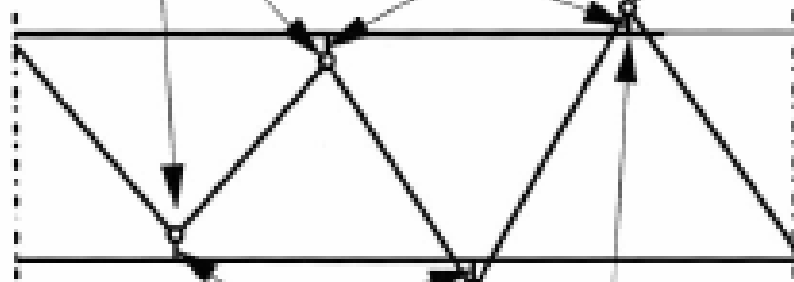
# Modelação dos nós



Noding condition  
for most overlap  
connections

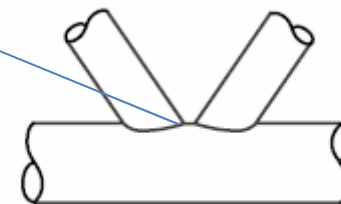
Extremely stiff  
members

Pin



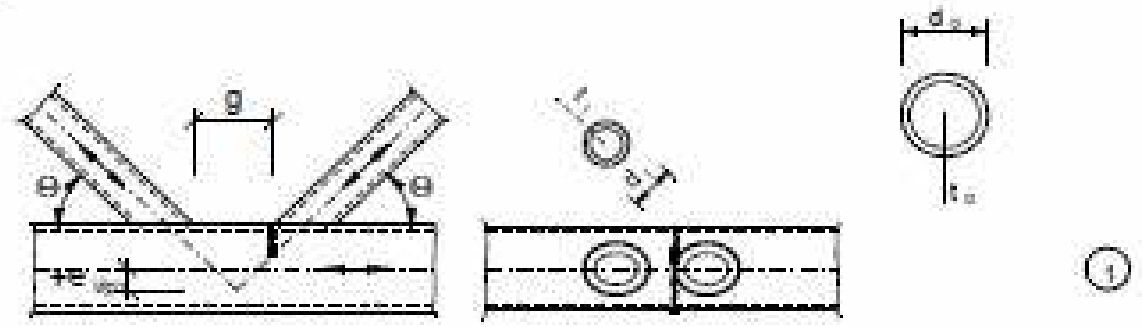
Extremely stiff  
members

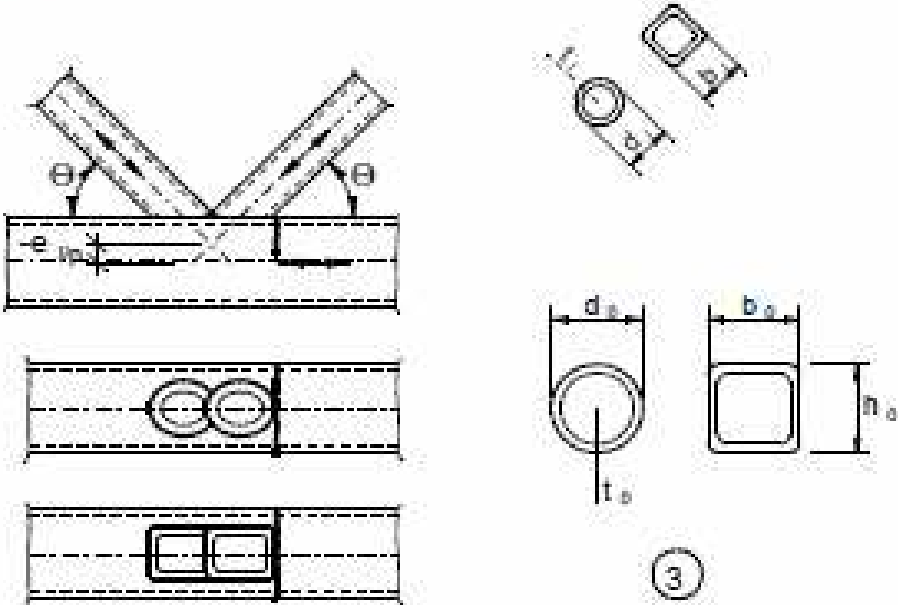
Noding condition  
for most gap  
connections



Adapt. a Ref. CIDEC

DESIGN GUIDE  
FOR CIRCULAR AND RECTANGULAR  
HOLLOW SECTION WELDED JOINTS  
UNDER FATIGUE LOADING

Categoria do pormenor	Pormenor construtivo	
<p>90 m=5</p>	<p><math>\frac{t_a}{t_r} \geq 2,0</math></p>	<p>Ligações com afastamento: Pormenor 1): Ligações em K e em N, secções tubulares circulares:</p> 
<p>45 m=5</p>	<p><math>\frac{t_b}{t_r} = 1,0</math></p>	<div style="border: 2px solid blue; padding: 10px; text-align: center;"> <p><b>Requisitos</b></p> <hr/> <p><u>Pormenores 1) e 2):</u> Quadro 8.7 -</p> </div>

Categoria do pormenor	Pormenor construtivo	
71 m=5	$\frac{t_0}{t_i} \geq 1,4$	<p>Ligações com sobreposição: Pormenor 3): Ligações em K, secções tubulares circulares ou rectangulares:</p> 
56 m=5	$\frac{t_0}{t_i} = 1,0$	

Requisitos

---

Pormenores 3) e 4): Quadro 8.7 -



## Nós de vigas trianguladas em pontes

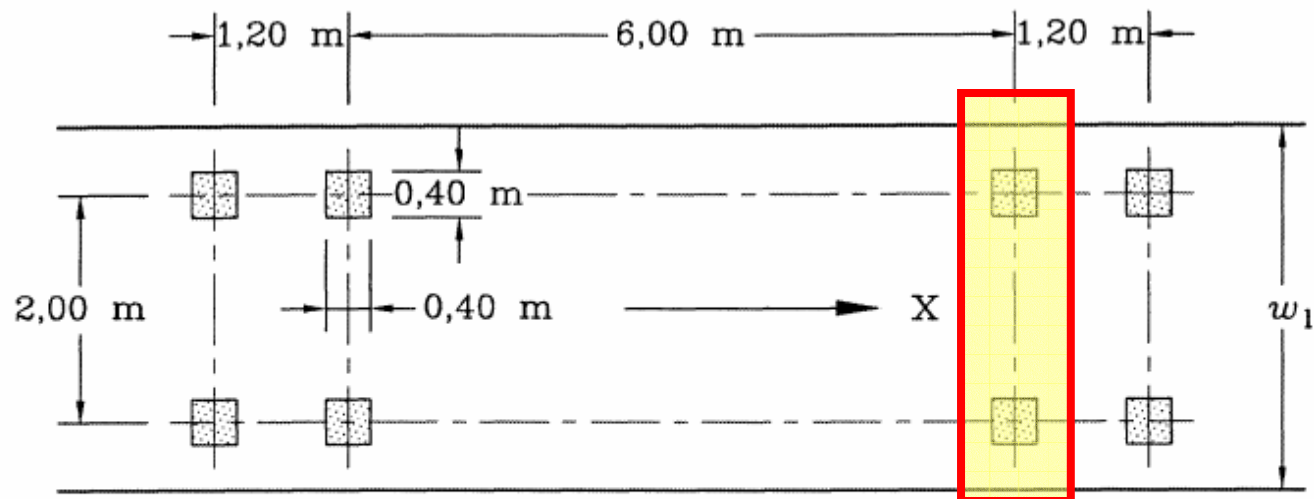
Adapt. Ref. "Resistence a la fadigue  
Guide de conception et justification"  
SETRA 1996



## Modelos de carga de Fadiga em pontes rodoviárias

- In case of a constant amplitude fatigue limit :
  - FLM1 : modified frequent loading
  - FLM2 : set of frequent lorries
- Traffic replaced by a single lorry (FLM3)
- Traffic is simulated by a set of lorries (FLM4)
- Measured traffic (FLM5)

FLM3 =  $2 \cdot 10^6$  passageiros



**eixo = 120 kN**

Amplitude de tensão equivalente a  $2 \times 10^6$  de ciclos:

$$\Delta\sigma_{E2}$$

$$\Delta\sigma_{E2} = \lambda \quad \Phi \quad \Delta\sigma$$

$\lambda$  – Factor de dano equivalente

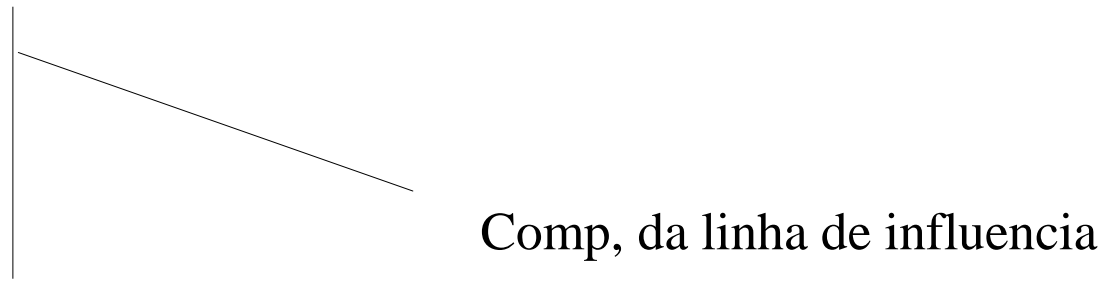
$\Phi$  – Factor dinâmico de dano equivalente

Pontes rodoviárias  $\Phi = 1$

## Factor de dano equivalente

$$\lambda = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 < \lambda_{\max}$$

- $\lambda_1$



- $\lambda_2$  : tráfego
- $\lambda_3$  : vida de projecto (  $\lambda_3=1$  para 100 anos)
- $\lambda_4$  : tráfego nas outras vias