

# Avaliação do Efeito de Cargas Concentradas em Vigas de Aço através de Algoritmos de Redes Neurais

Elaine Toscano Fonseca  
Pedro C G S Vellasco

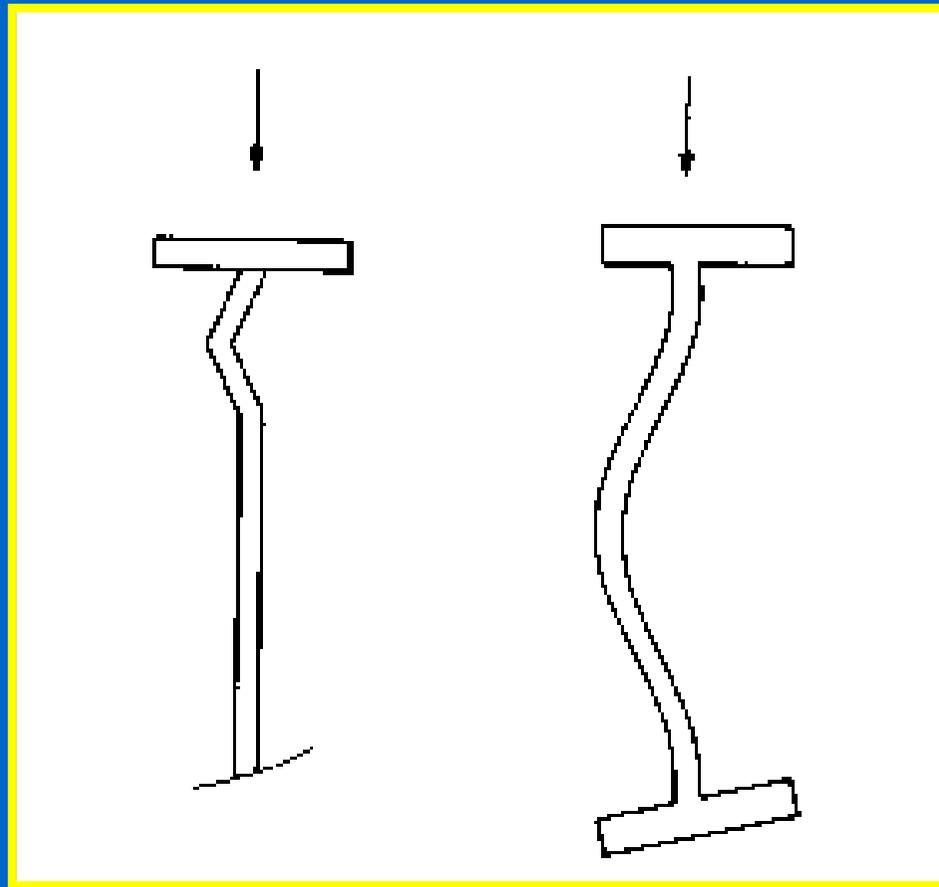
# Escopo da Apresentação

- Introdução
- Revisão Bibliográfica
- Redes Neurais
- Utilização das Redes Neurais na Previsão da carga Crítica
- Avaliação das Redes e Análise Paramétrica
- Considerações Finais

# Motivação

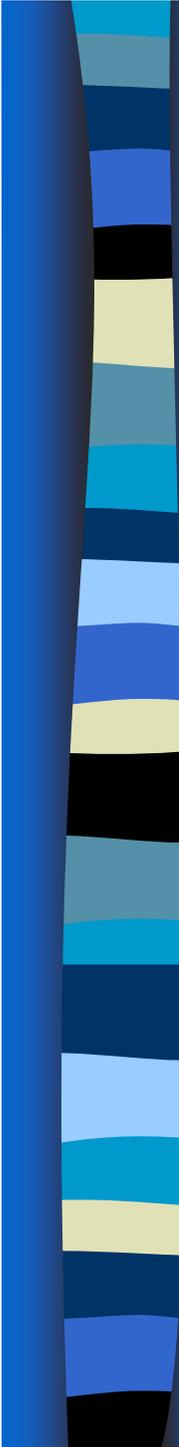
- Grande parte das estruturas de aço trabalham com cargas concentradas (ex.: Pontes Rolantes).
- A busca da melhor solução requer a utilização de perfis cada vez mais esbeltos;
- O colapso da estrutura pode ocorrer por plastificação ou por problemas de instabilidade.

# Motivação



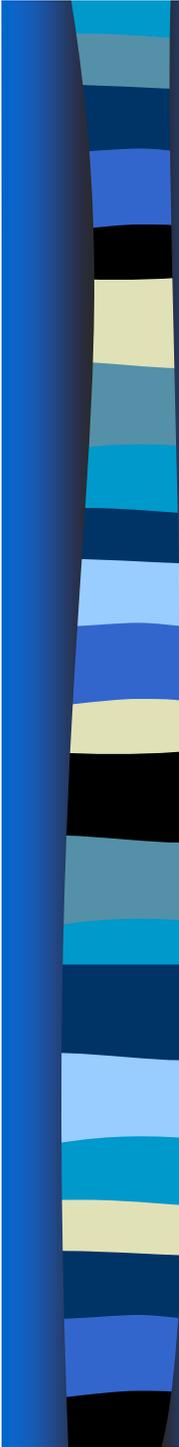
Crippling

Flambagem



# Motivação

- Fórmulas de previsão da carga utilizadas em normas fornecem erros superiores a 20%;
- Dados existentes na literatura insuficientes para uma análise paramétrica completa;
- A criação de novos resultados experimentais é um processo que envolve muito tempo e dinheiro;



# Motivação

- Resultados via método dos elementos finitos ainda apresentam diferenças.
- As Redes Neurais, quando bem treinadas, podem fornecer novos resultados confiáveis.

# Objetivos

- Avaliar o comportamento estrutural de vigas sujeitas a cargas concentradas através de uma análise paramétrica;
- Gerar novos dados que possibilitem esta análise utilizando redes neurais;
- Executar uma revisão bibliográfica;
- Verificar a possibilidade da utilização de resultados gerados por elementos finitos para avaliação e/ou treinamento das redes;

# Revisão Bibliográfica

- Lyse & Godfrey (1935):

$$\sigma_{crit} = \frac{P}{t_w(c + 2t_f)} \leq \sigma_y$$

- Bergfelt:

- Espessura da alma, comprimento do enrijecedor (1968);
- Nova equação (1979):

$$P_f = 0.8t_w^2 \sqrt{E\sigma_y^w \left(\frac{t_i}{t_w}\right)} f *$$

# Revisão Bibliográfica

## ■ Bergfelt:

- Espessura da alma, comprimento do enrijecedor (1968);
- Colapso em 3 fases (1976);
  - CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE COLAPSO:
    - 1- ATÉ PLASTIFICAÇÃO NA SUPERFÍCIE DA ALMA.
    - 2- ATÉ APARECIMENTO DE PEQUENAS DOBRAS NA ALMA.
      - 3- DESTE PONTO EM DIANTE ATÉ O COLAPSO.
        - COLAPSO:
          - 1- FLAMBAGEM GLOBAL DA ALMA.
          - 2- FLAMBAGEM LOCALIZADA NA REGIÃO
          - PRÓXIMA A CARGA CONCENTRADA.

# Revisão Bibliográfica

## ■ Bergfelt:

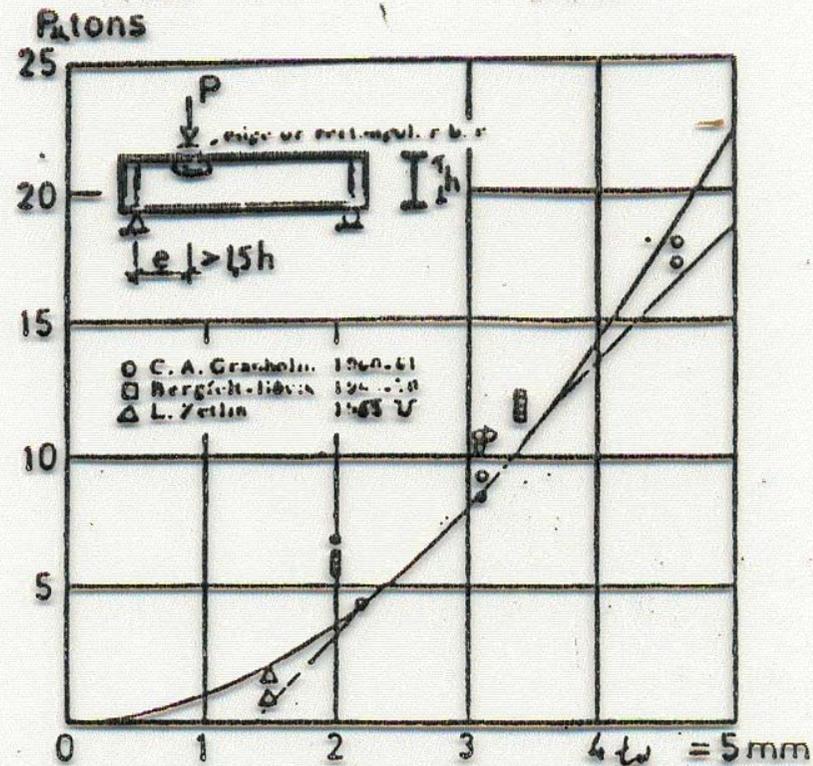


Figure 2.4 - Influence of the Thickness of the Web on the Failure Load.  
(after [BERG71])



# Revisão Bibliográfica

## ■ Bergfelt:

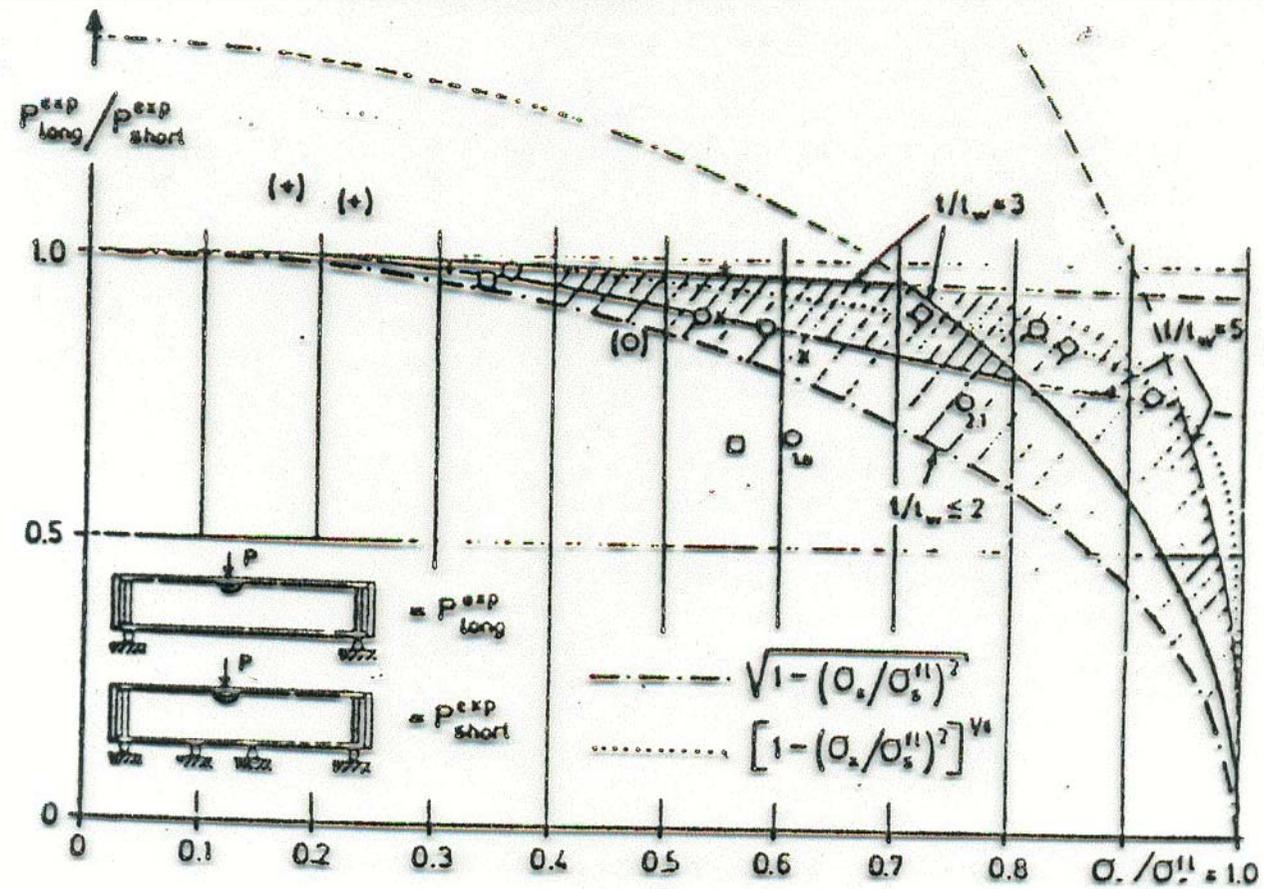


Figure 2.15 - Interaction Patch/Bending.

(after [BERG79])

# Revisão Bibliográfica

## ■ Bergfelt:

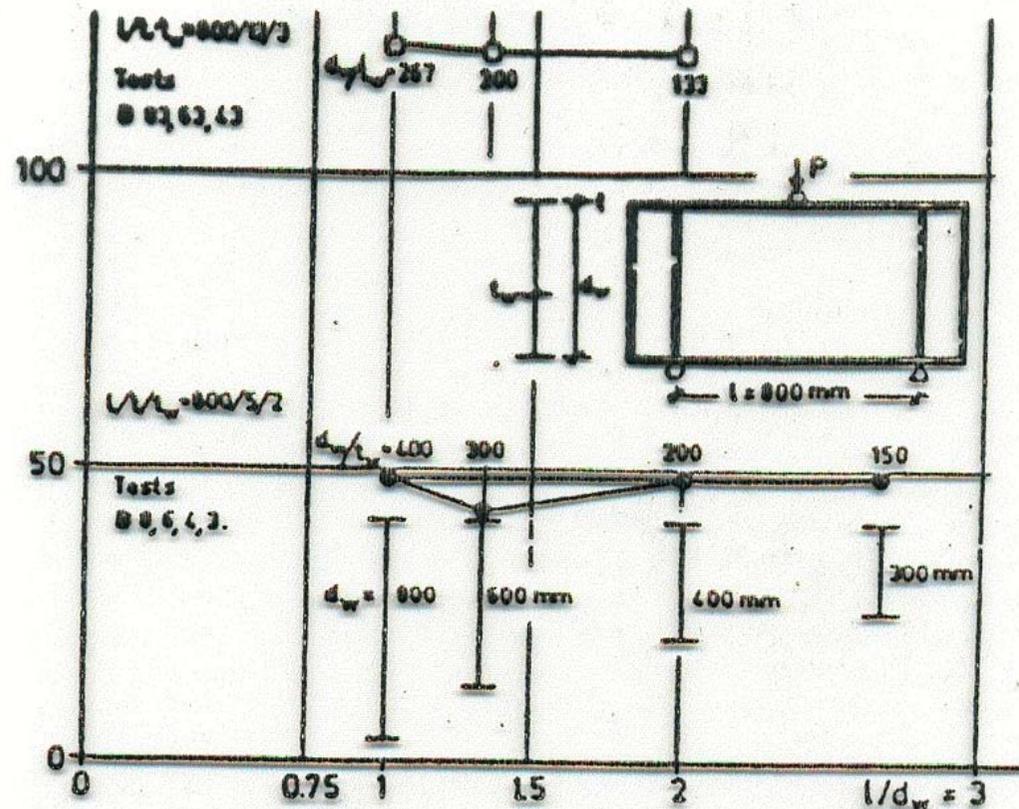


Figure 2.14 - Influence of the Height of the Beam on the Failure Load.  
(after [BERG79])

# Revisão Bibliográfica

- Bergfelt:

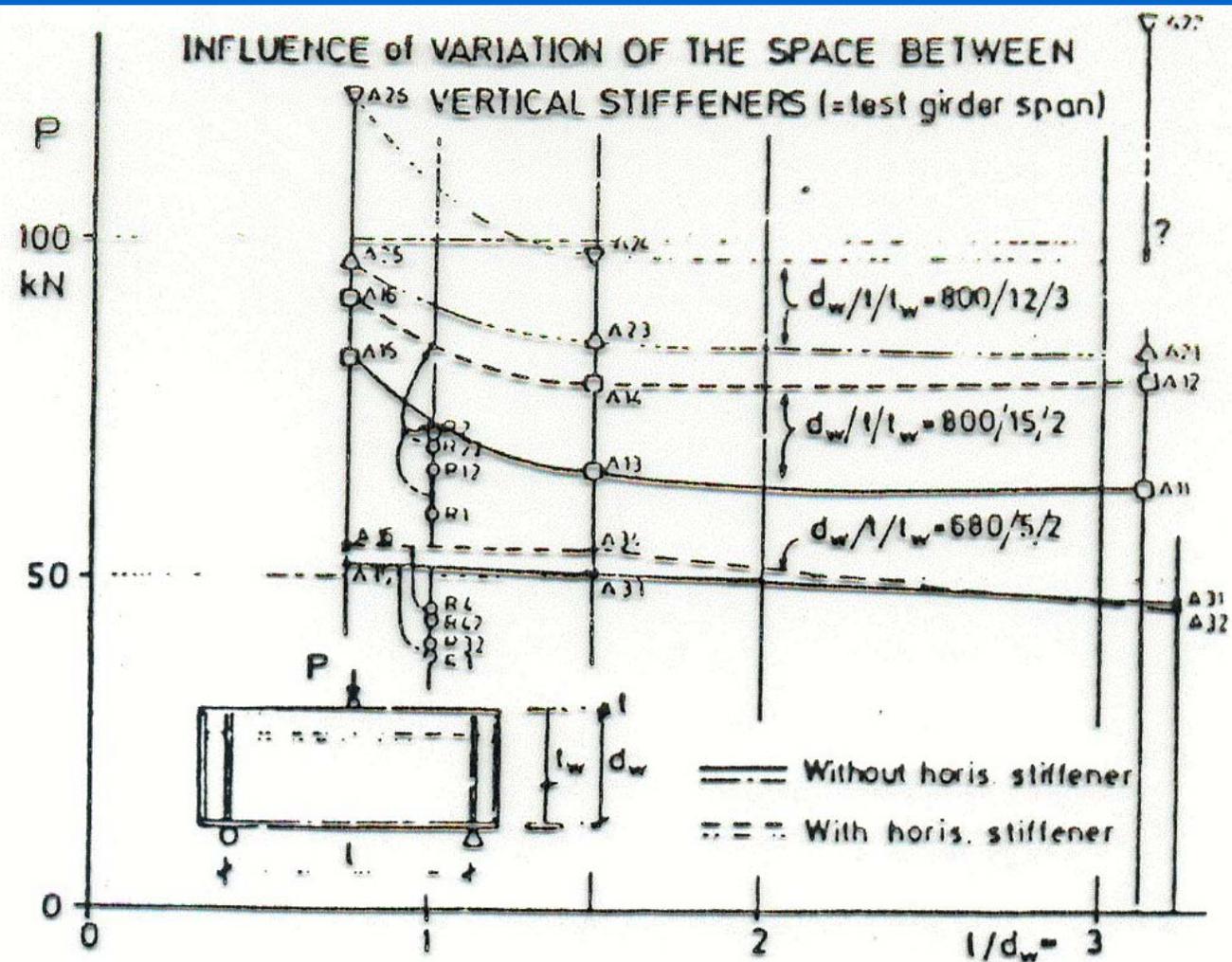


Figure 2.13 - Influence of the Variation of the Space Between Vertical Stiffeners on the Failure Load. (after [BERG79])

# Revisão Bibliográfica

## ■ Roberts:

- Mecanismo de rótulas plásticas (1978);
- Testes confirmam proporcional -  $t_w^2$  e  $t_f$  (1981);
- 2 equações (1981):
  - Flambagem da alma (+ significativa 1983);

$$P_f = 0.5t_w^2 \sqrt{E\sigma_y^w \frac{t_f}{t_w} \left[ 1 + \left( \frac{3c}{h} \right) \left( \frac{t_f}{t_w} \right)^{3/2} \right]}$$

- Plastificação da alma (almas espessas);

$$P_f = \left( \frac{4M_f}{\beta} \right) + \sigma_y^w t_w (\beta + c)$$

$$\beta^2 = 4(M_f / \sigma_y^w) t_w$$

# Revisão Bibliográfica

## ■ Roberts:

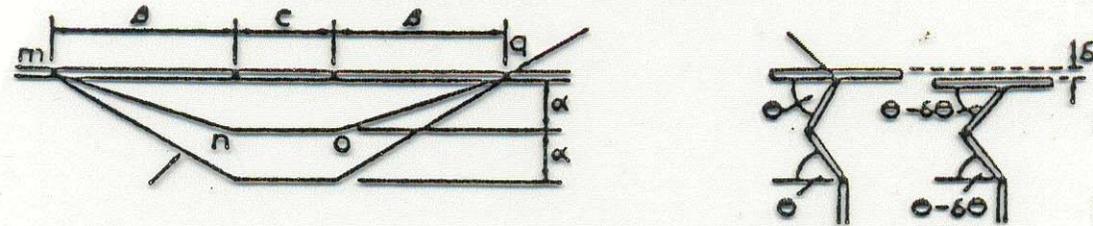


Figure 2.5 - Collapse Mechanism. (after [ROBE78])

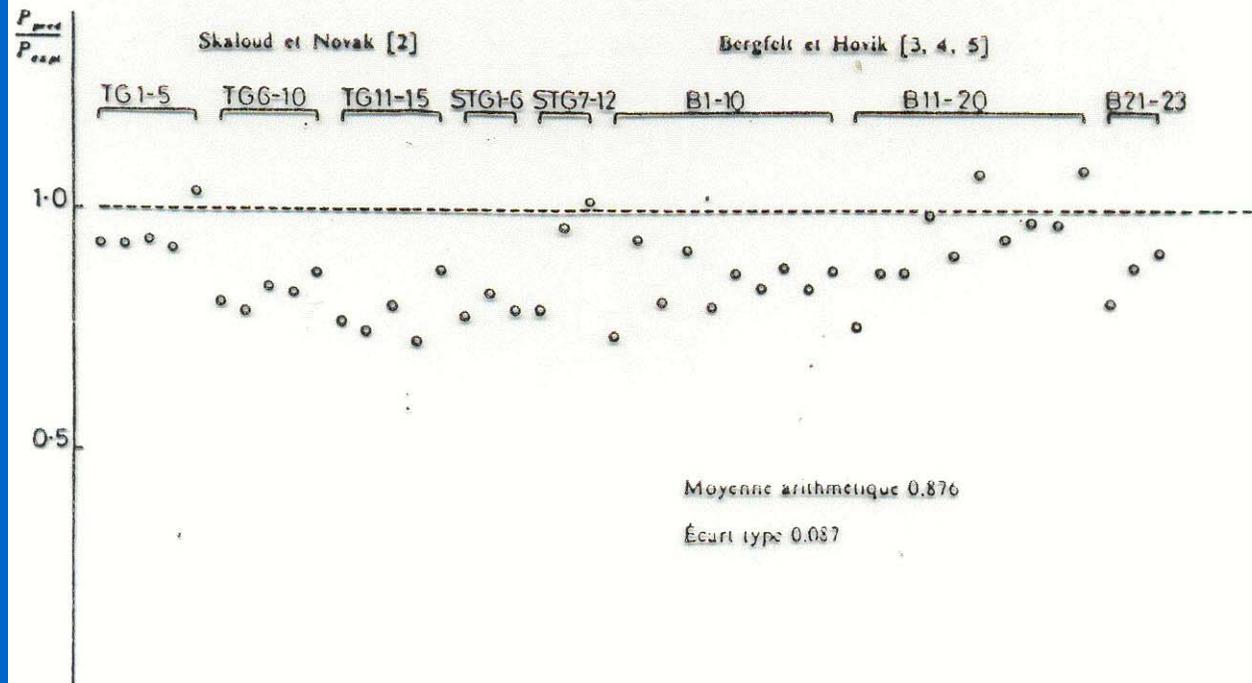


Figure 2.6 - Comparison of Equation 2.12 with Experimental Results. (after [ROBE78])

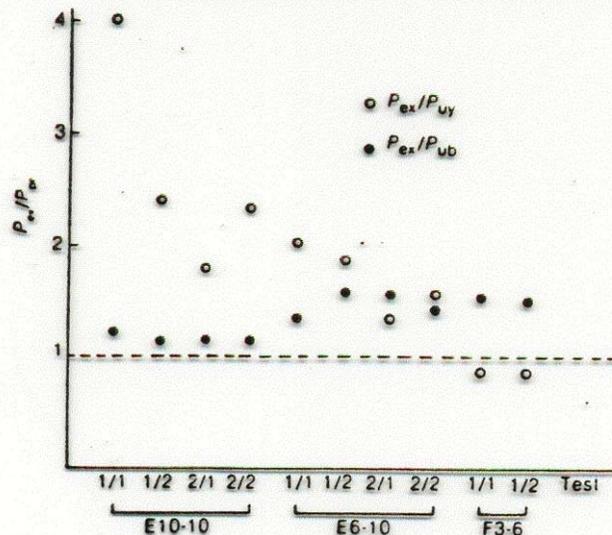
# Revisão Bibliográfica

## ■ Roberts:

DEFINE DOIS ESTADOS LIMITES:

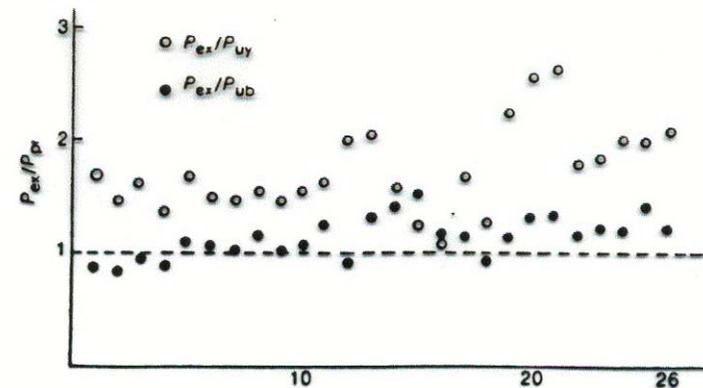
1- FLAMBAGEM DA ALMA.

$$P_f = 0.5 t_w^2 \sqrt{E \sigma_y} t_f / t_w [1 + (3 c/h) (t_w/t_f)^{3/2}]$$



2 - PLASTIFICAÇÃO DIRETA DA ALMA.  
(VIGAS COM FLANGES ESPESSOS)

$$P_f = 4 \sqrt{M_{fl} \sigma_y} t_w + \sigma_y t_w c$$



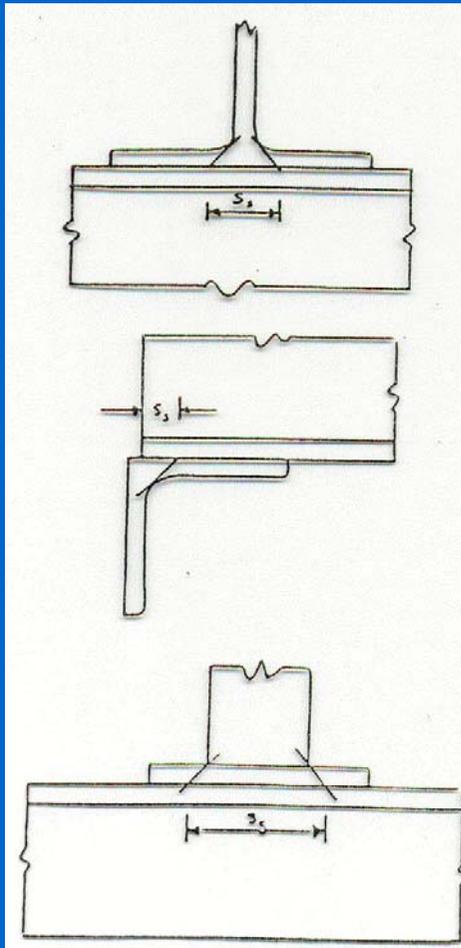
CONCLUI QUE SÓ O PRIMEIRO É SIGNIFICATIVO.

# Revisão Bibliográfica

- BERGFELT x ROBERTS:
- MODO DE COLAPSO:
- RÓTULAS NAS MESAS → MOMENTO (-)
- SEGUIDO DE:
- PLASTIFICAÇÃO OU FLAMBAGEM DA ALMA  
X
- DETERMINAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE RÓTULAS PLÁSTICAS NAS MESAS → MÉTODO DOS TRABALHOS VIRTUAIS

# Revisão Bibliográfica

## ■ Eurocode:

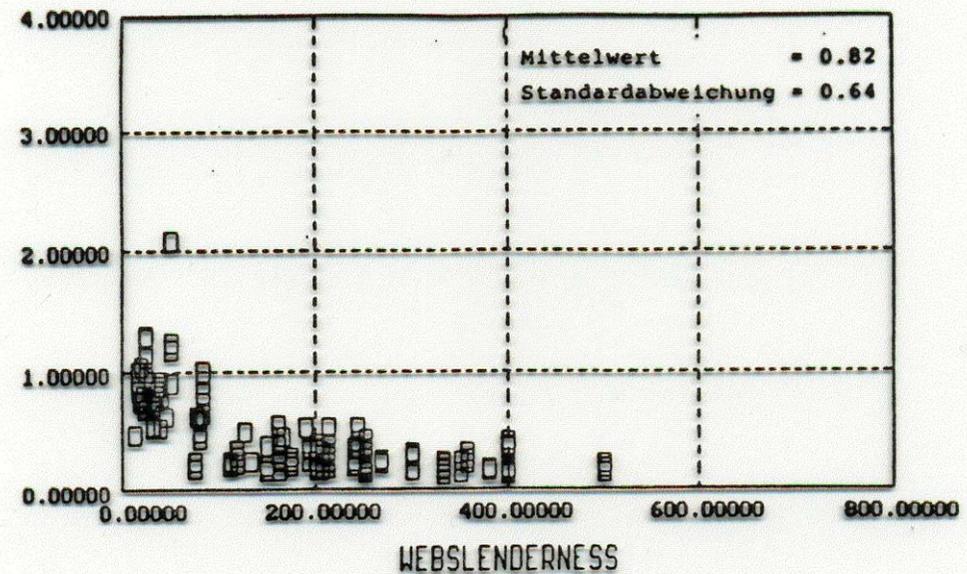


EUROCODE, (1991)

PLASTIFICAÇÃO:

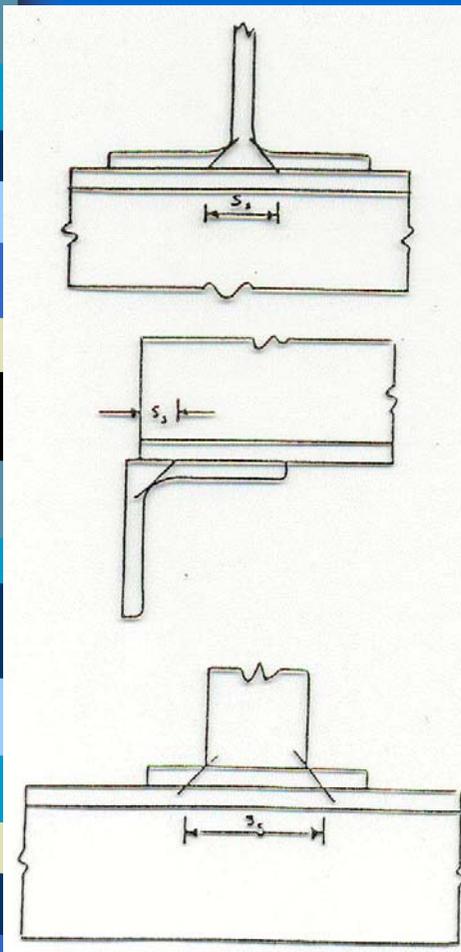
$$P_f = (S_s + S_y) t_w \sigma_y^w / \gamma_m$$

MÉDIA = 0.82, DESVIO PADRÃO = 64%



# Revisão Bibliográfica

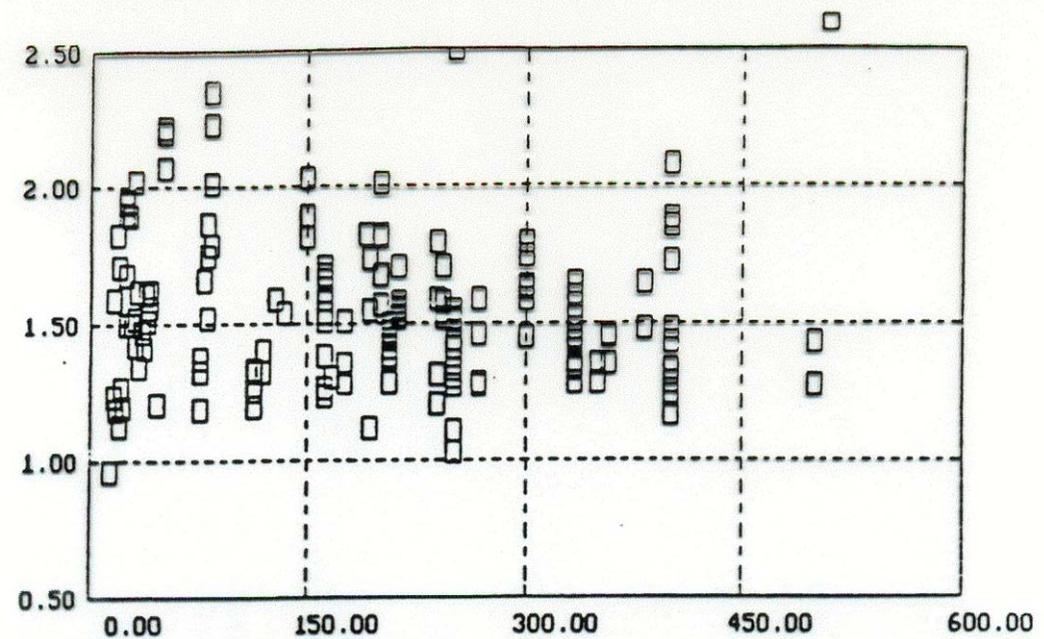
## ■ Eurocode:



FLAMBAGEM:

$$P_f = 0.5 t_w^2 \sqrt{E \sigma_y} \left( \sqrt{\frac{t_f}{t_w} + \frac{3 S_s t_w}{h t_f \gamma_m}} \right)$$

MÉDIA = 1.558, DESVIO PADRÃO = 28%



# Revisão Bibliográfica

- Solução Simplificada e comparação com resultados experimentais (1997):

$$P_f = \left[ 1.1 t_w^2 \left( E \sigma_y^w \right)^{0.5} \left( \frac{t_f}{t_w} \right)^{0.25} \left( 1 + \frac{c_e t_w}{h t_f} \right) \right] \frac{1}{F}$$

- Kennedy (1997):
  - Gerou mais 31 dados experimentais;
  - Nova formulação para previsão da carga crítica.

# Revisão Bibliográfica

- Souza (1995):
  - Simulação não-linear do problema de cargas concentradas utilizando o Programa Saloof desenvolvido por Andrade (1983);
  - Constatou que os erros entre as fórmulas e os resultados de elementos finitos eram da ordem de 20%.

# Revisão Bibliográfica

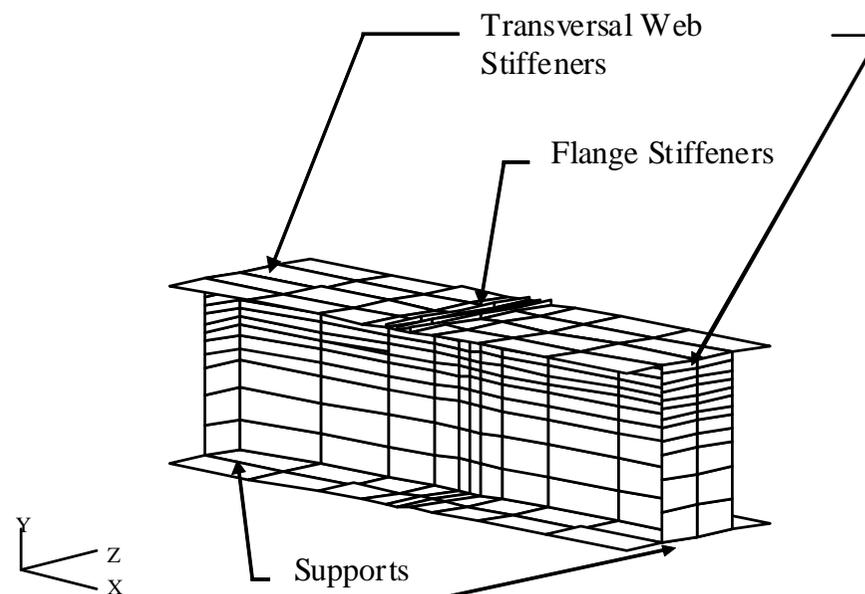


Figure 1 - Finite element mesh adopted.

# Revisão Bibliográfica

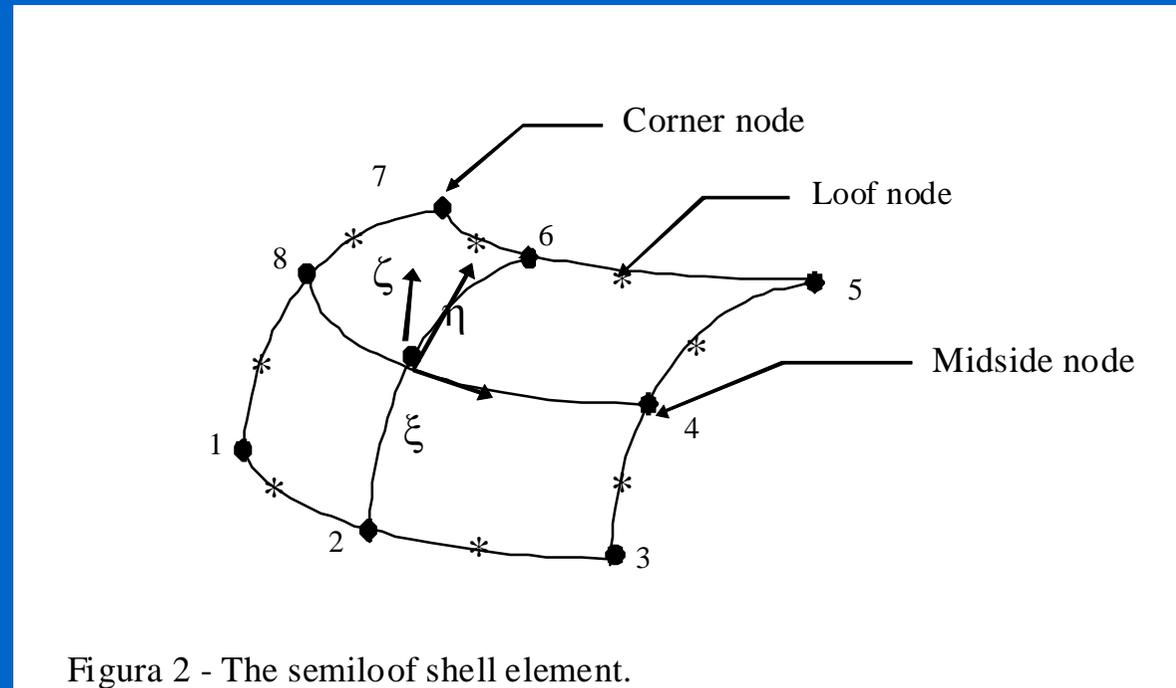


Figura 2 - The semiloof shell element.

# Revisão Bibliográfica

| Girder | b(m<br>m) | d(m<br>m) | $t_w$<br>(mm) | $b_f$<br>(mm) | $t_f$ (m<br>m) | c(m<br>m) | $\sigma_w$<br>(MPa) | $\sigma_f$<br>(MPa) |
|--------|-----------|-----------|---------------|---------------|----------------|-----------|---------------------|---------------------|
| b14    | 2400      | 400       | 2             | 100           | 8              | 180       | 294                 | 294                 |
| R01    | 800       | 800       | 2             | 300           | 15             | 40        | 266                 | 295                 |
| R03    | 800       | 800       | 2             | 120           | 5              | 40        | 266                 | 285                 |
| b08    | 800       | 800       | 2             | 120           | 5              | 40        | 285                 | 290                 |
| b83    | 800       | 800       | 3             | 250           | 12             | 40        | 328                 | 298                 |

Table 1 - Beam's geometric and material characteristics.

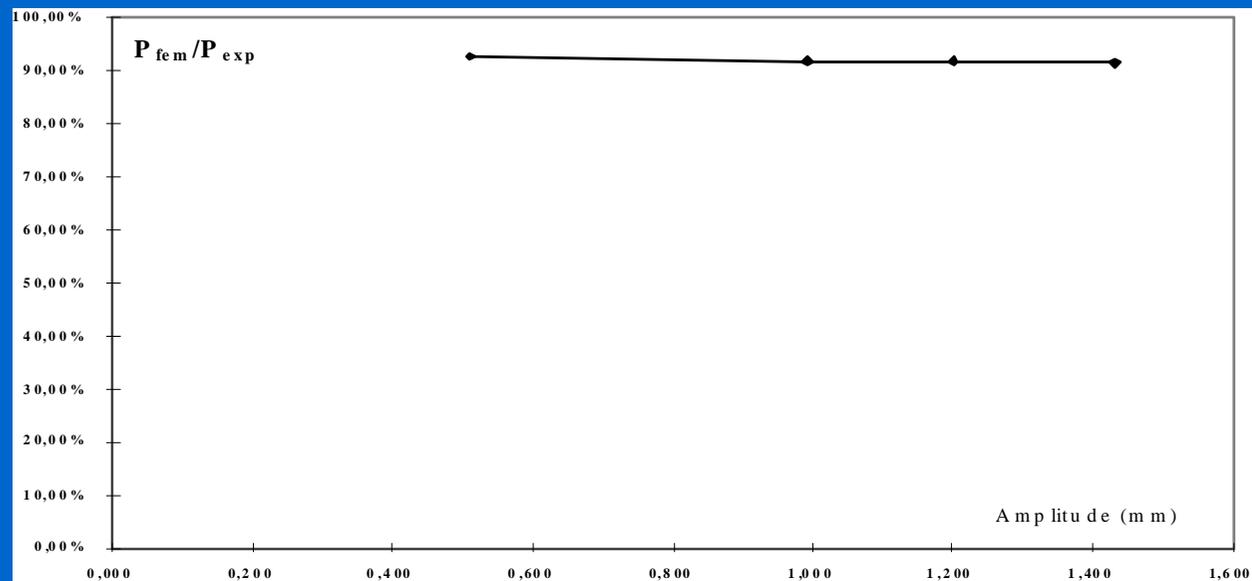


Figure 3 - Influence of amplitude of initial imperfections.

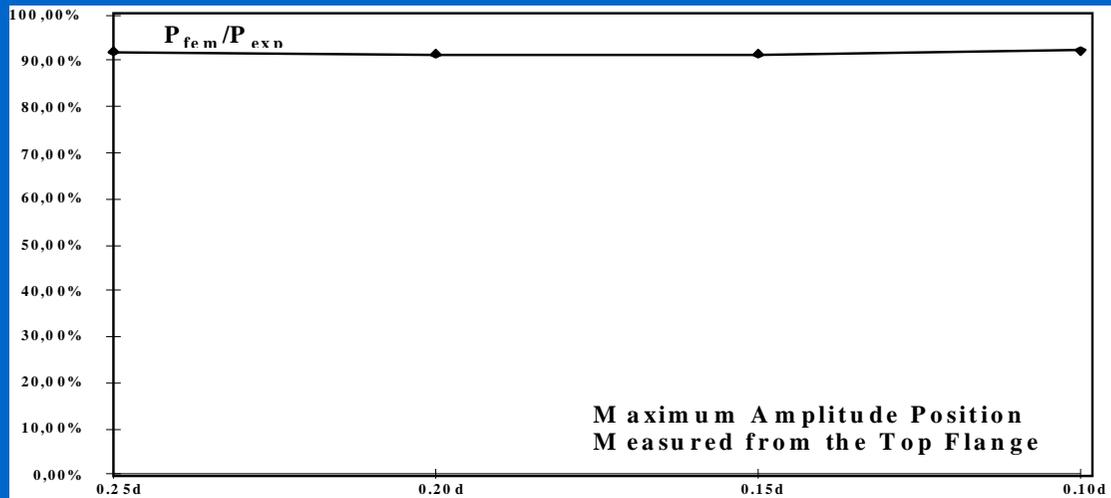


Figure 4 - Influence of the position of the initial imperfections.

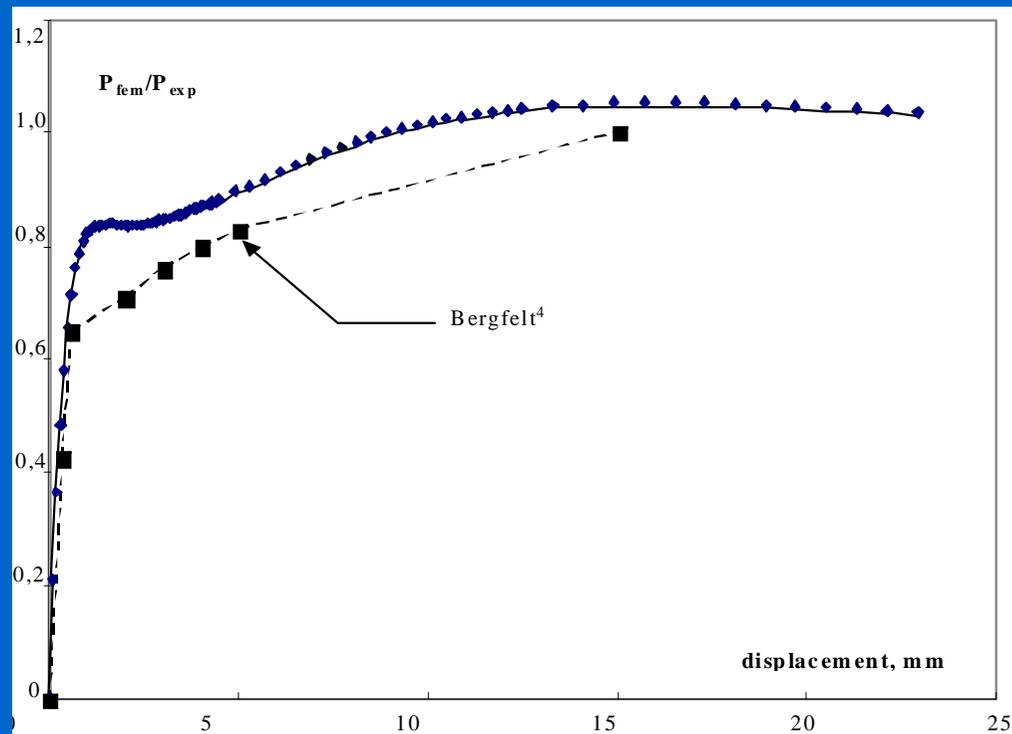


Figure 5 - Load versus vertical displacement, beam R01.

Table 2 - Collapse load comparison.

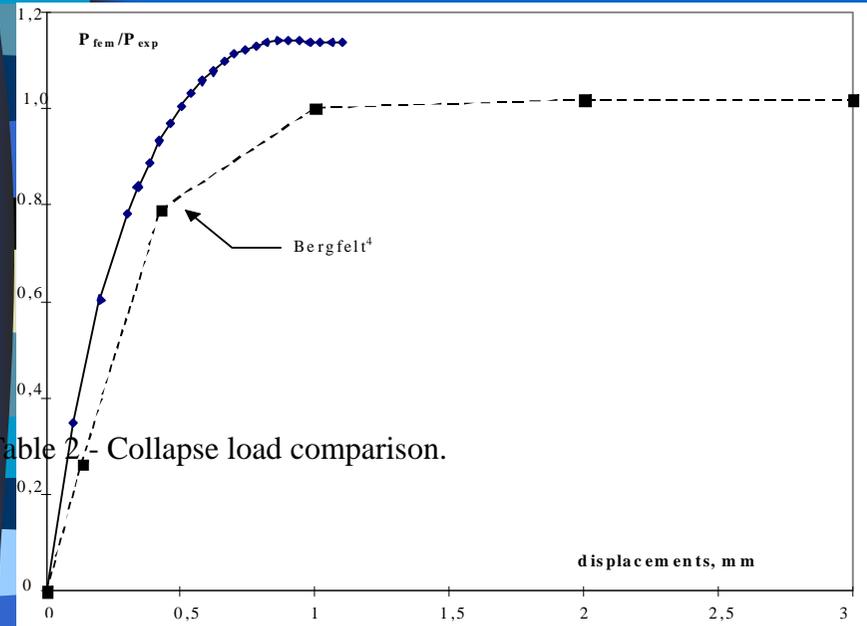


Figure 6 - Load versus vertical displacement, beam R03.

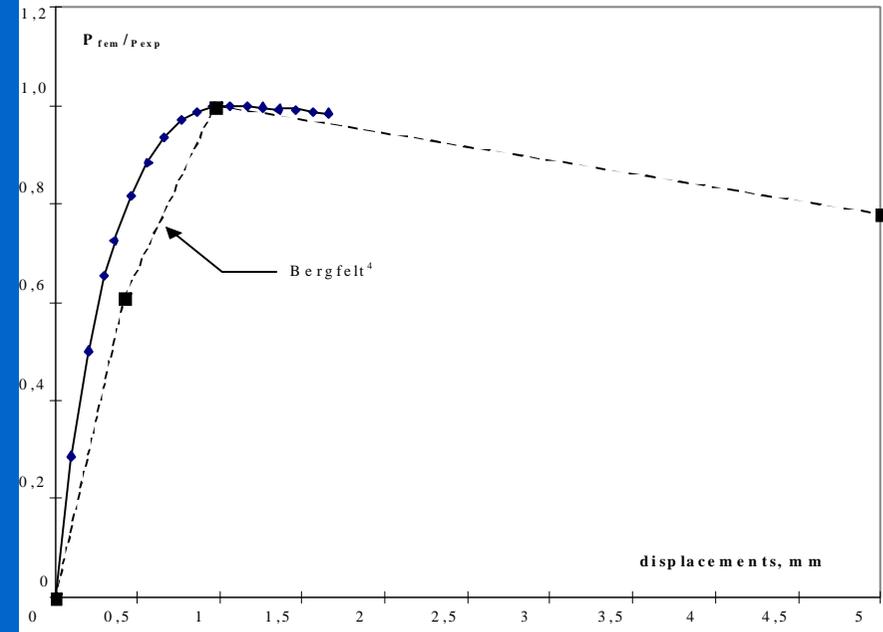


Figure 7 - Load versus vertical displacement, beam b08.

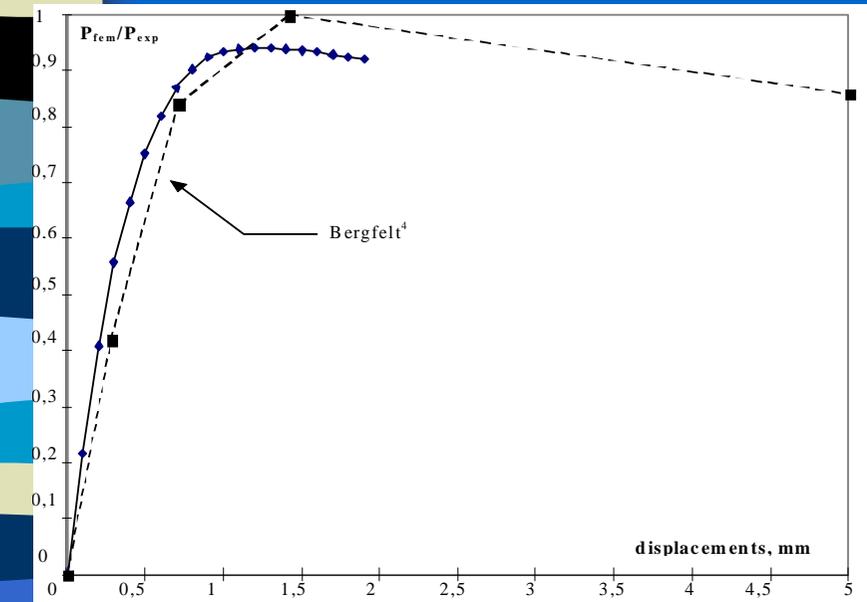


Figure 8 - Load versus vertical displacement, beam b83.

| Girder | $P_{exp}$ (kN) | $P_{fem}$ (kN) | Difference (%) |
|--------|----------------|----------------|----------------|
| b14    | 60.00          | 54.76          | 8.74           |
| R01    | 84.50          | 89.00          | 5.32           |
| R03    | 38.00          | 43.15          | 14.06          |
| b08    | 48.00          | 48.01          | 0.01           |
| b83    | 121.00         | 113.55         | 6.15           |

STATIC  
DISPLACEMENT  
VONMISE

60.2%  $P_{exp}$



STATIC  
DISPLACEMENT  
VONMISE

114.0%  $P_{exp}$



STATIC  
DISPLACEMENT  
VONMISE

112.0%  $P_{exp}$



STATIC  
DISPLACEMENT  
VONMISE

113.0%  $P_{exp}$



Figure 9 - Buckling shape and web's stress distribution, beam R03.

$$P_{Cr} = 0.11 t_w^2 \left( E \sigma_w (c + 2t_f) / t_w \right) + \sqrt{\frac{b_f t_f}{100 t_w^2}} \sqrt{E \sigma_f t_w^5 (c + 2t_f)} \quad (1)$$

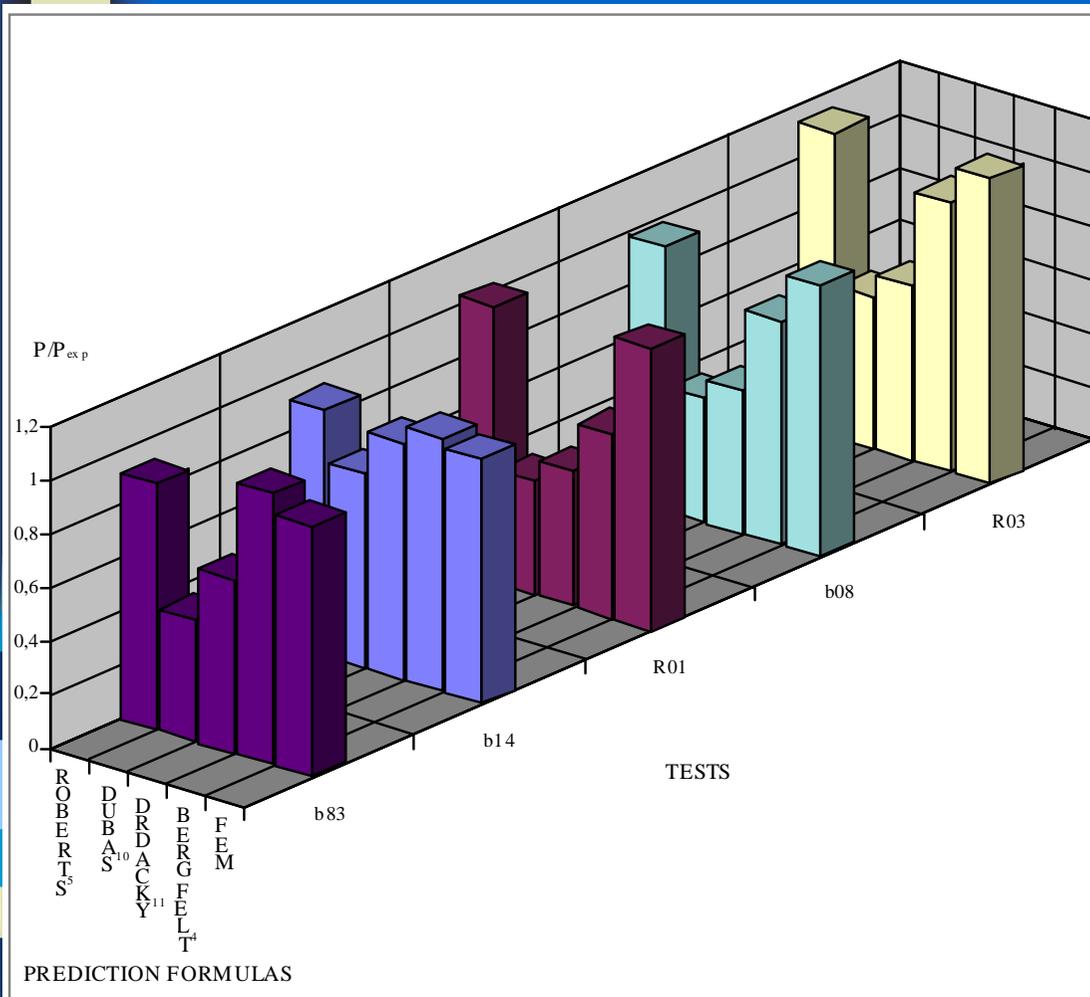


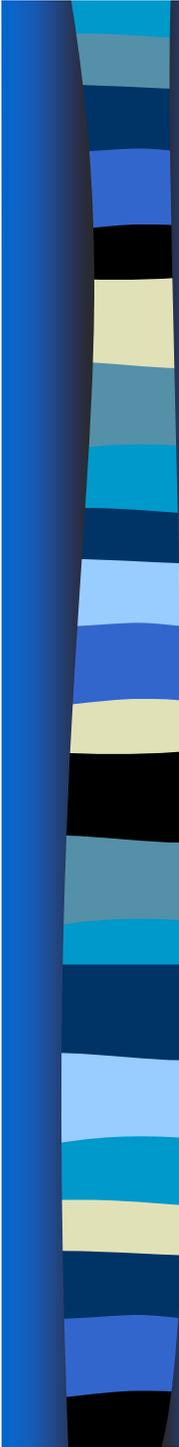
Figure 10 - Finite element model validation against collapse formulas.

$$P_{Cr} = 0.8 t_w^2 \sqrt{E \sigma_w} \sqrt{\frac{t_i}{t_w}} f(\Theta) \quad (2)$$

$$t_i = t_f \sqrt[4]{b_f / (25 t_f)}$$

$$P_{Cr} = 0.77 t_w^2 (0.9 + 1.5c/d) \sqrt{E \sigma_w t_f / t_w} \quad (3)$$

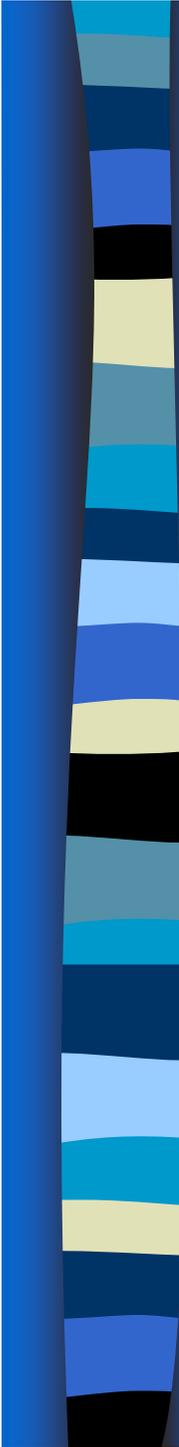
$$P_{Cr} = 0.55 t_w (0.9 t_w + c t_w / d) \sqrt{E \sigma_w t_f / t_w} \quad (4)$$



# Inteligência Computacional

Conjunto de técnicas inspiradas na Natureza para o desenvolvimento de sistemas inteligentes, que imitam características do comportamento humano. Ex.:

- Aprendizado;
- Raciocínio;
- Evolução;
- Adaptação.

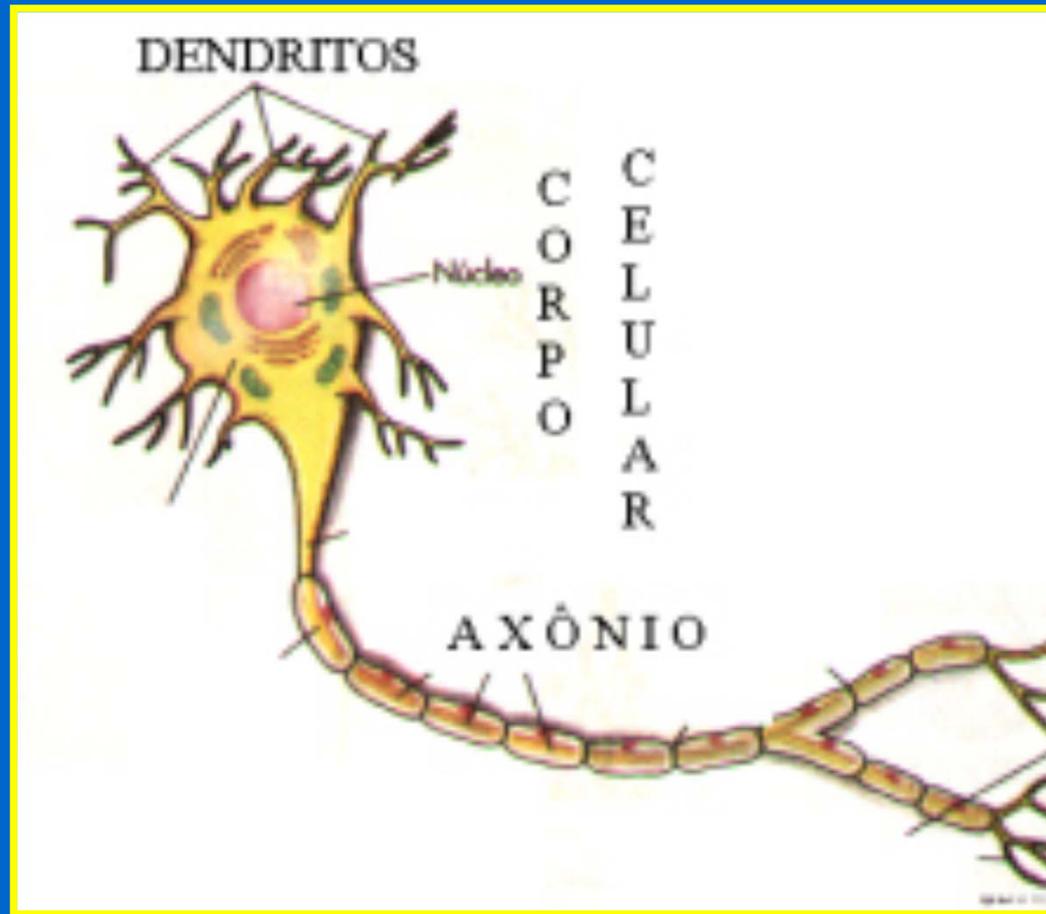


# Redes Neurais

Inspiradas na estrutura do cérebro para apresentar características humanas, tais como:

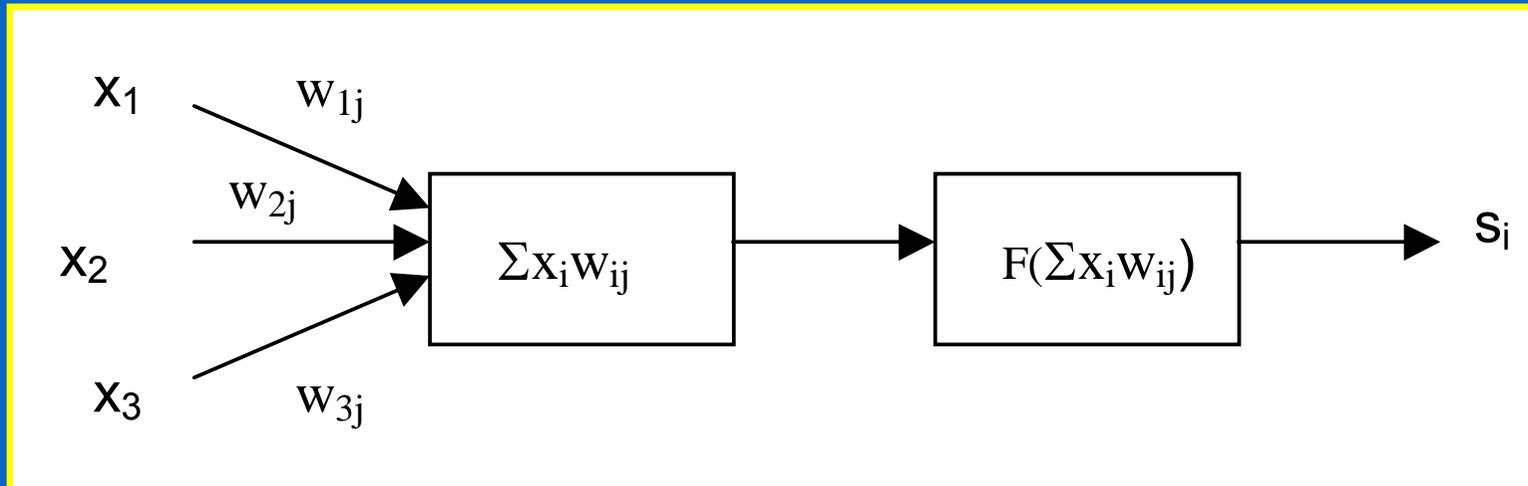
- Aprendizado por experiência;
- Generalização de novos exemplos;
- Abstração;
- Associação entre padrões diferentes.

# Neurônio Biológico



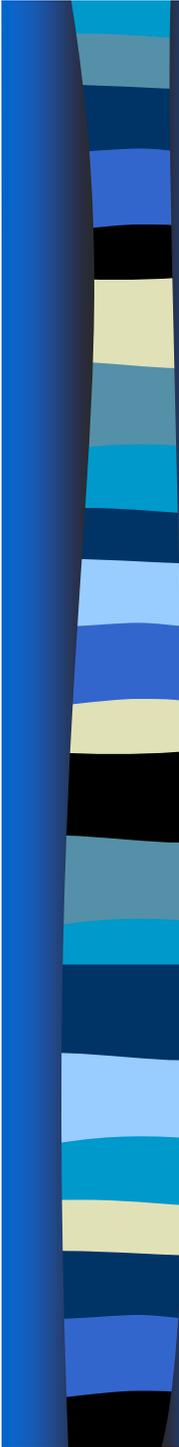
Recebe, processa e transmite os impulsos nervosos.

# Neurônio Artificial



Recebe, processa e transmite as informações.

As redes neurais tem uma estrutura organizada em camadas de elementos processadores conectadas entre si. A organização depende do algoritmo.



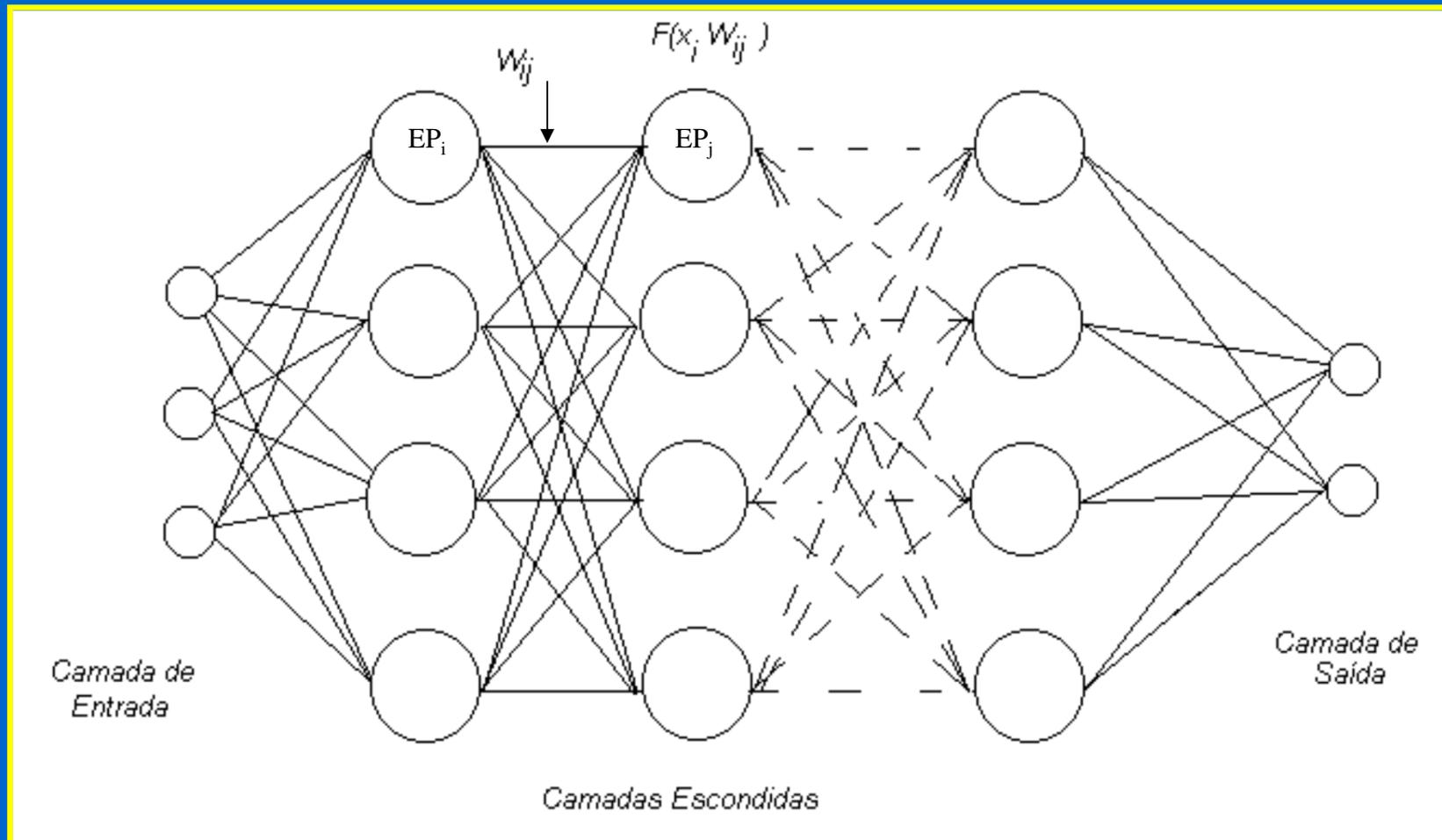
# Algoritmos de Redes Neurais

O aprendizado das redes pode ocorrer através de um treinamento supervisionado ou não-supervisionado.

Backpropagation:

- Treinamento supervisionado;
- Aproximador universal.

# Rede Backpropagation



*Feed-Forward*

*Feed-Backward*

# Aplicações das Redes Neurais

- Previsão de séries temporais;
- Detecção e diagnóstico de falhas;
- Reconhecimento de imagens;
- Reconhecimento de voz;
- Reconhecimento de caracteres impressos (OCR);
- Detecção de fraude em cartões de crédito;
- Avaliação de risco;
- Determinação do perfil de consumidores;

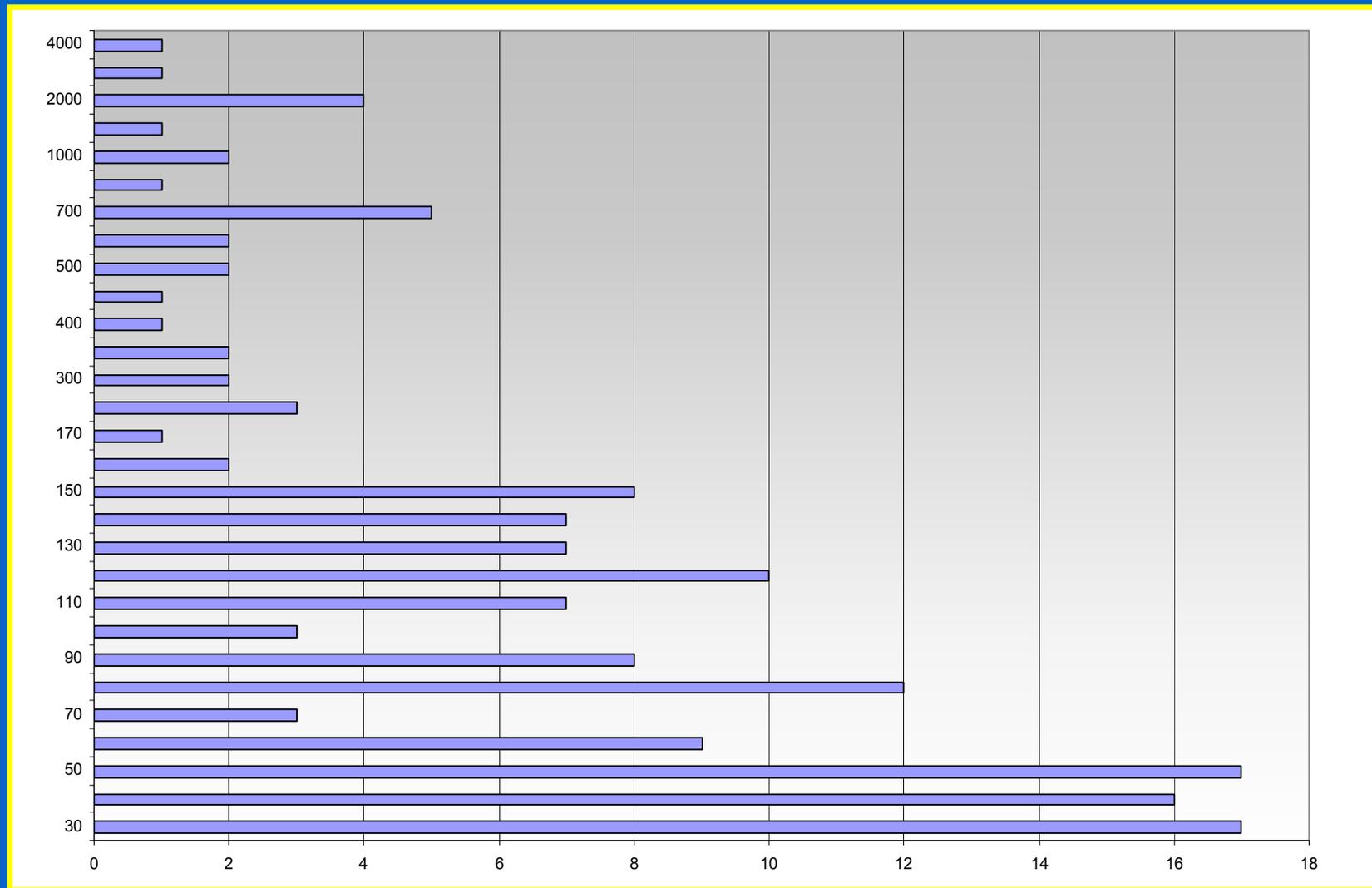
# Aplicações em Estruturas

- Resistência de estruturas a terremotos;
- Classificação e previsão de problemas na análise sísmica;
- Avaliação do comportamento de ligações semi-rígidas no eixo de menor inércia.

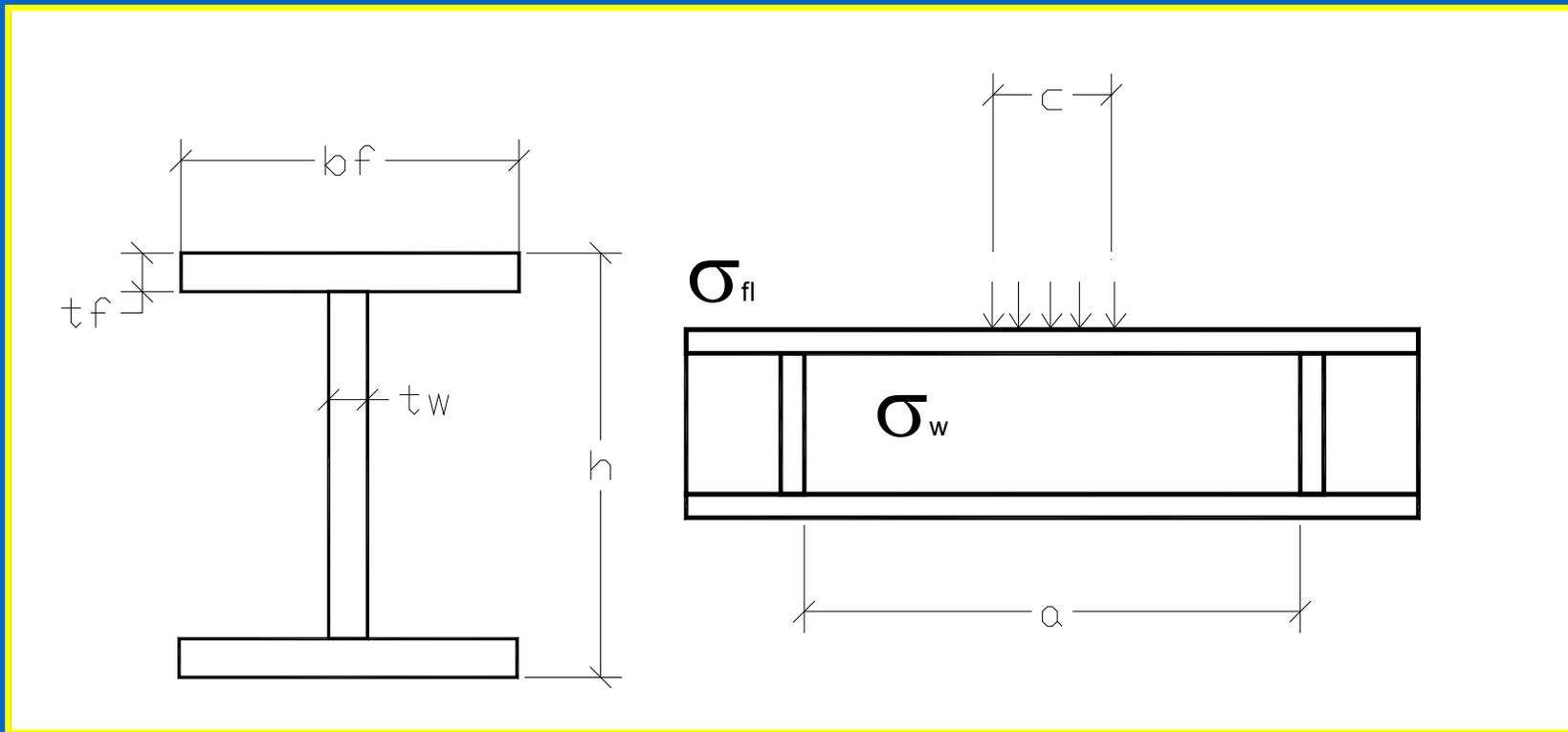
# Primeira Modelagem de Redes Neurais

- 161 dados experimentais existentes na Literatura com carga última entre 8.45 e 4010 kN;
- As funções de ativação dos elementos processadores fornecem resultados entre 0 e 1;
- Melhor normalização utilizando um intervalo menor. Até 120kN.

# Quantidade de Dados por Faixa de Carga



# Propriedades Geométricas e do Material



- Espessura da alma ao quadrado.

# Resultados Preliminares

- Opções do Software NeuralWorks Predict:
  - Nivel de ruído dos dados;
  - Transformação dos dados. Ex.:  $x^2$ ,  $1/x$ ;
  - Seleção de variáveis;
  - Busca da rede;
  - Tolerância;
  - Função de Ativação.
- Erros da ordem de 30%.

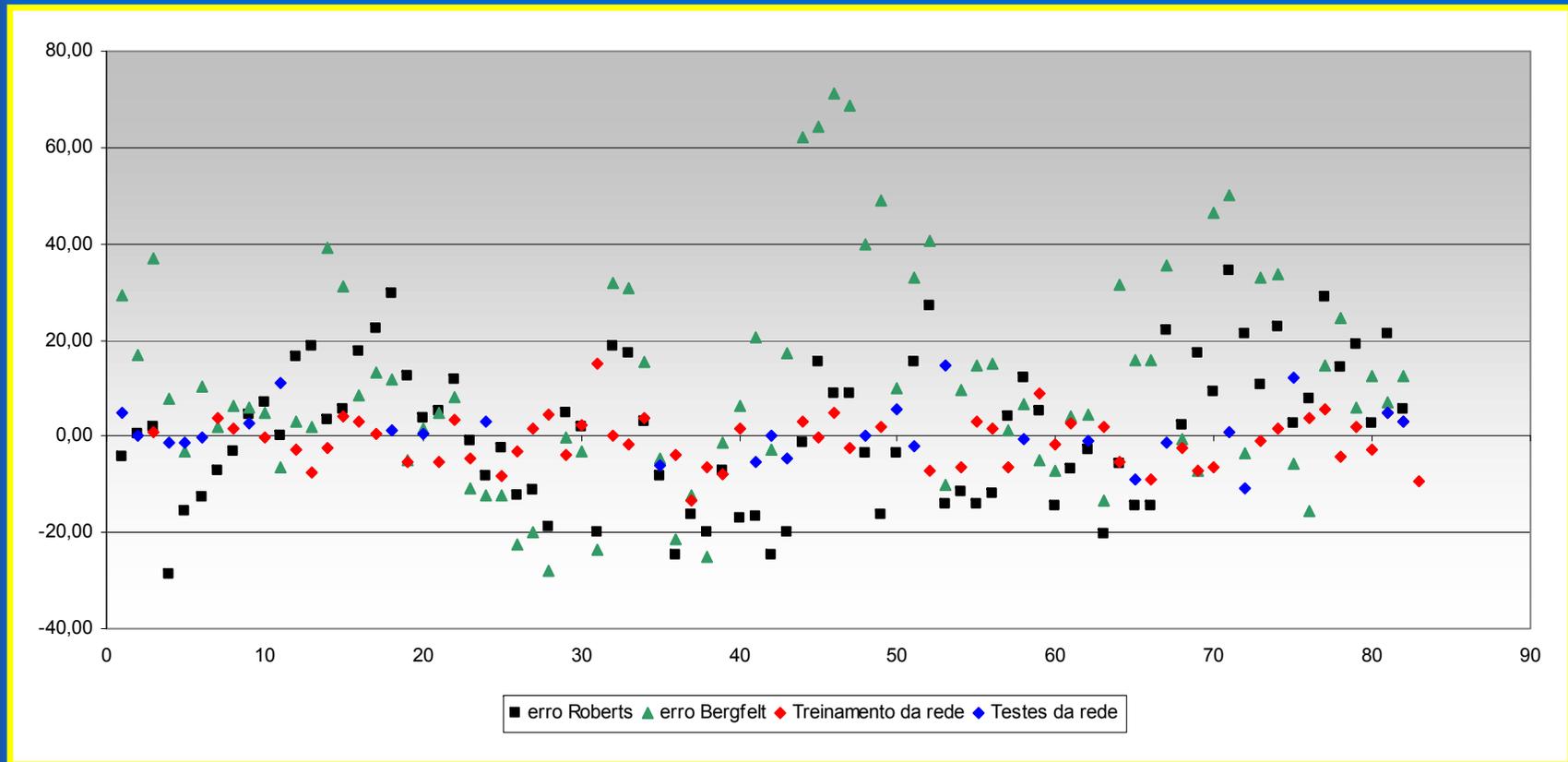
# Novo Treinamento

- Inserção de parâmetros combinados:

|         |           |             |         |               |
|---------|-----------|-------------|---------|---------------|
| $a / h$ | $t_w / h$ | $t_f / t_w$ | $c / h$ | $c t_w / a h$ |
|---------|-----------|-------------|---------|---------------|

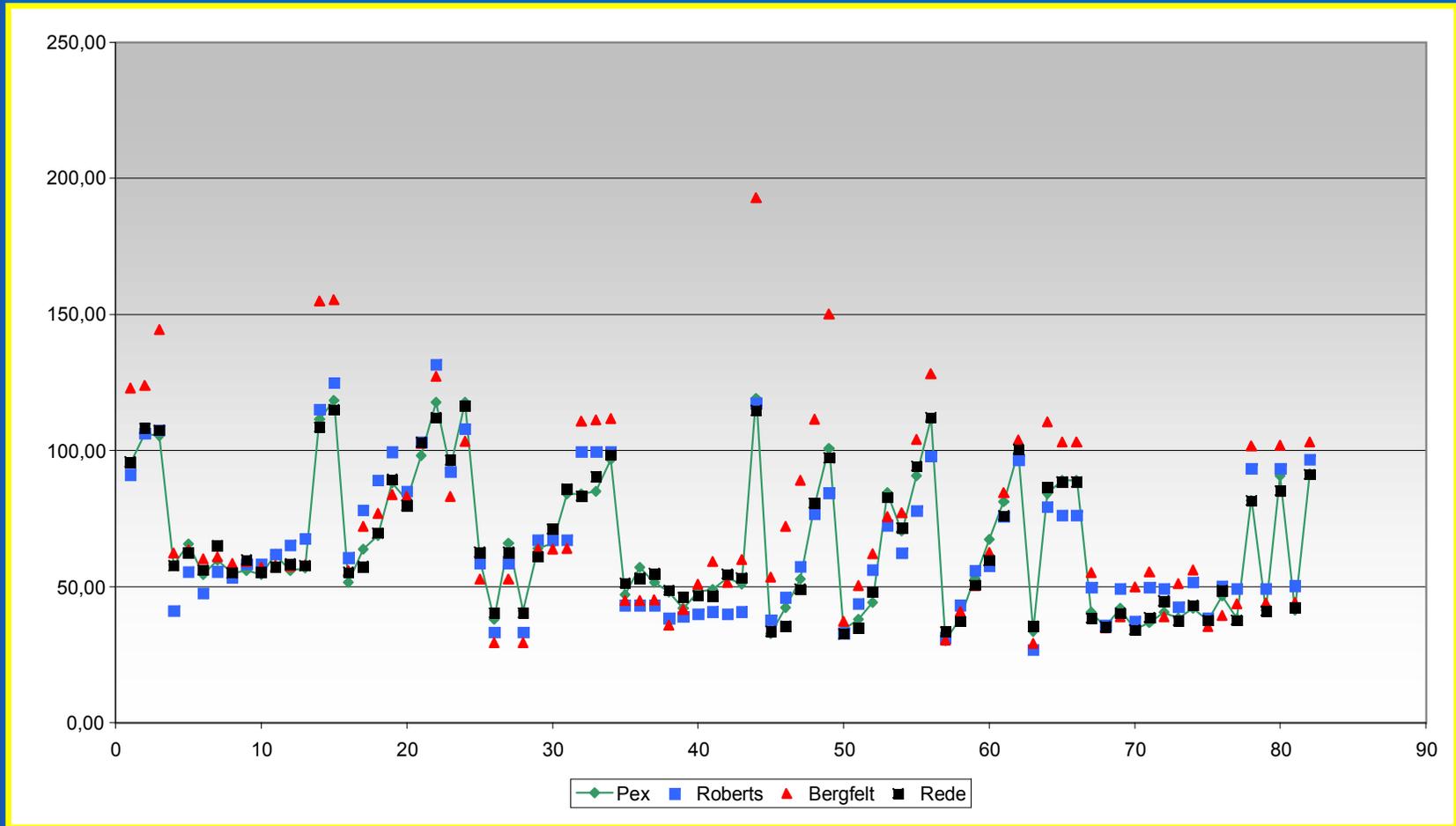
- Retirada dos dados de espessura de alma inferior a 1 mm:
  - Não se ajustaram bem a nenhuma das configurações de rede treinadas;
  - Dificuldade de ensaio de vigas com esta característica.
- Redução do erro máximo de 30 para 17%.

# Resultados da Primeira Modelagem

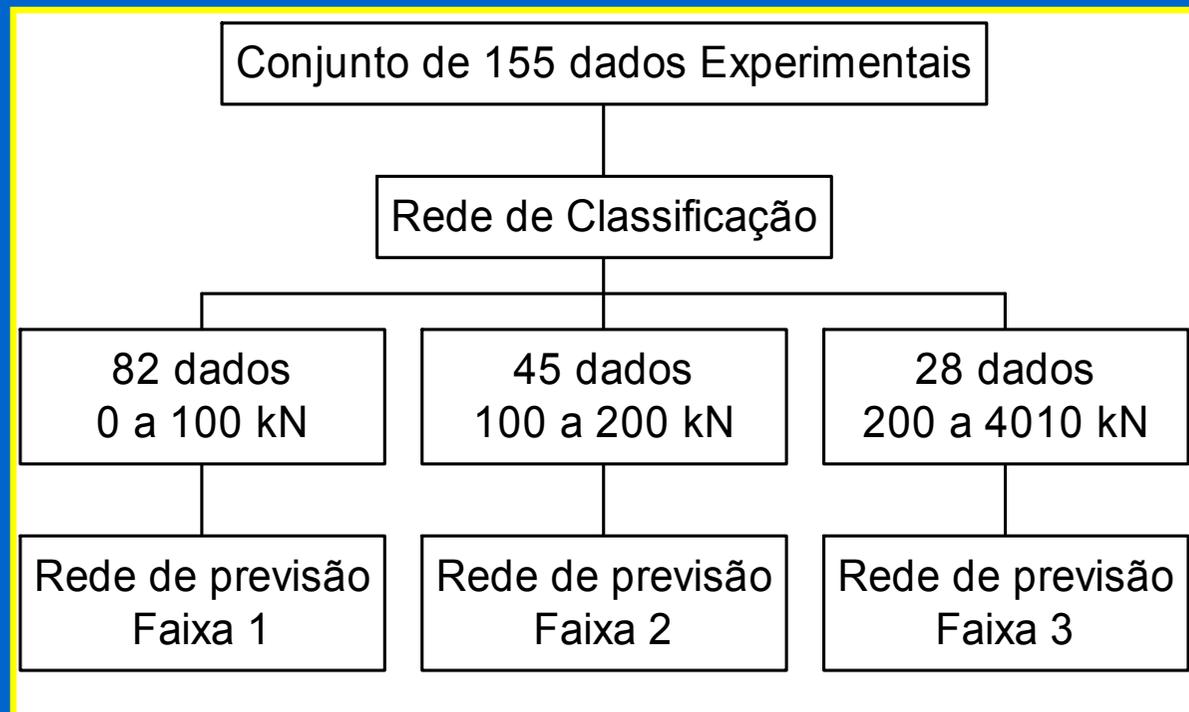
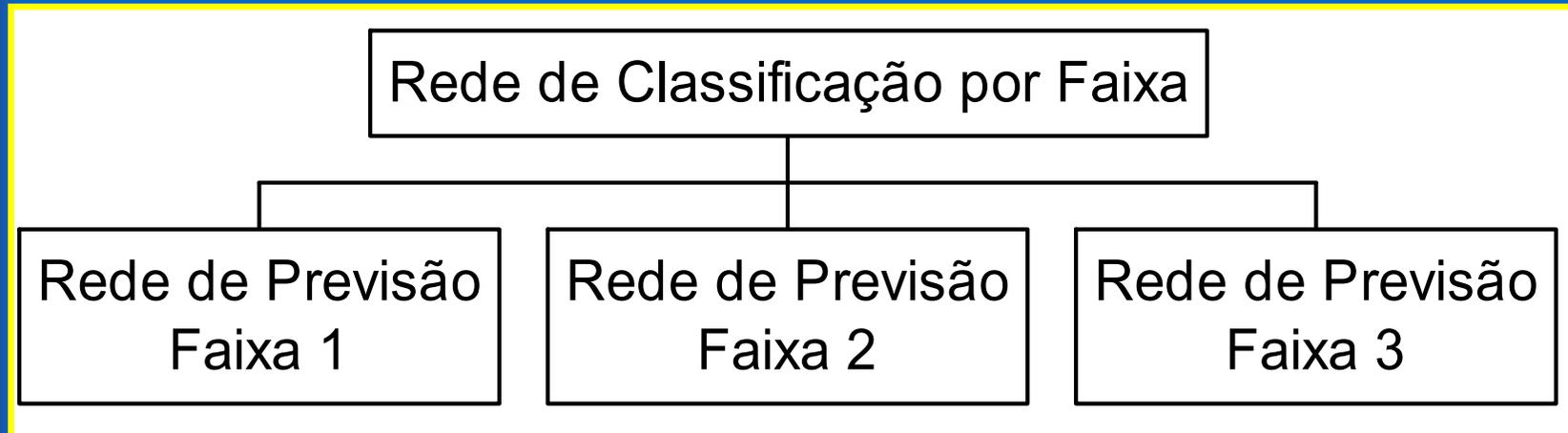


| Método                    | Roberts (2.9) | Bergfelt (2.7) | Rede Neural |
|---------------------------|---------------|----------------|-------------|
| Erro Médio do Treinamento | 18.03         | 26.66          | 5.97        |
| Erro médio dos Testes     | 13.05         | 14.26          | 3.55        |

# Resultados da Primeira Modelagem



# Modelagem Final



# Modelagem Final

## Quantidade de Dados por Faixa

| Faixas de Carga | Dados para Treinamento e Teste | Faixas de Carga com Superposição | Dados para Treinamento e Teste |
|-----------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| 0 a 100         | 82                             | 0 a 121.64                       | 89                             |
| 100 a 200       | 45                             | 79.68 a 252.75                   | 65                             |
| Maior que 200   | 28                             | Maior que 150                    | 46                             |

## Saídas da Rede de Classificação

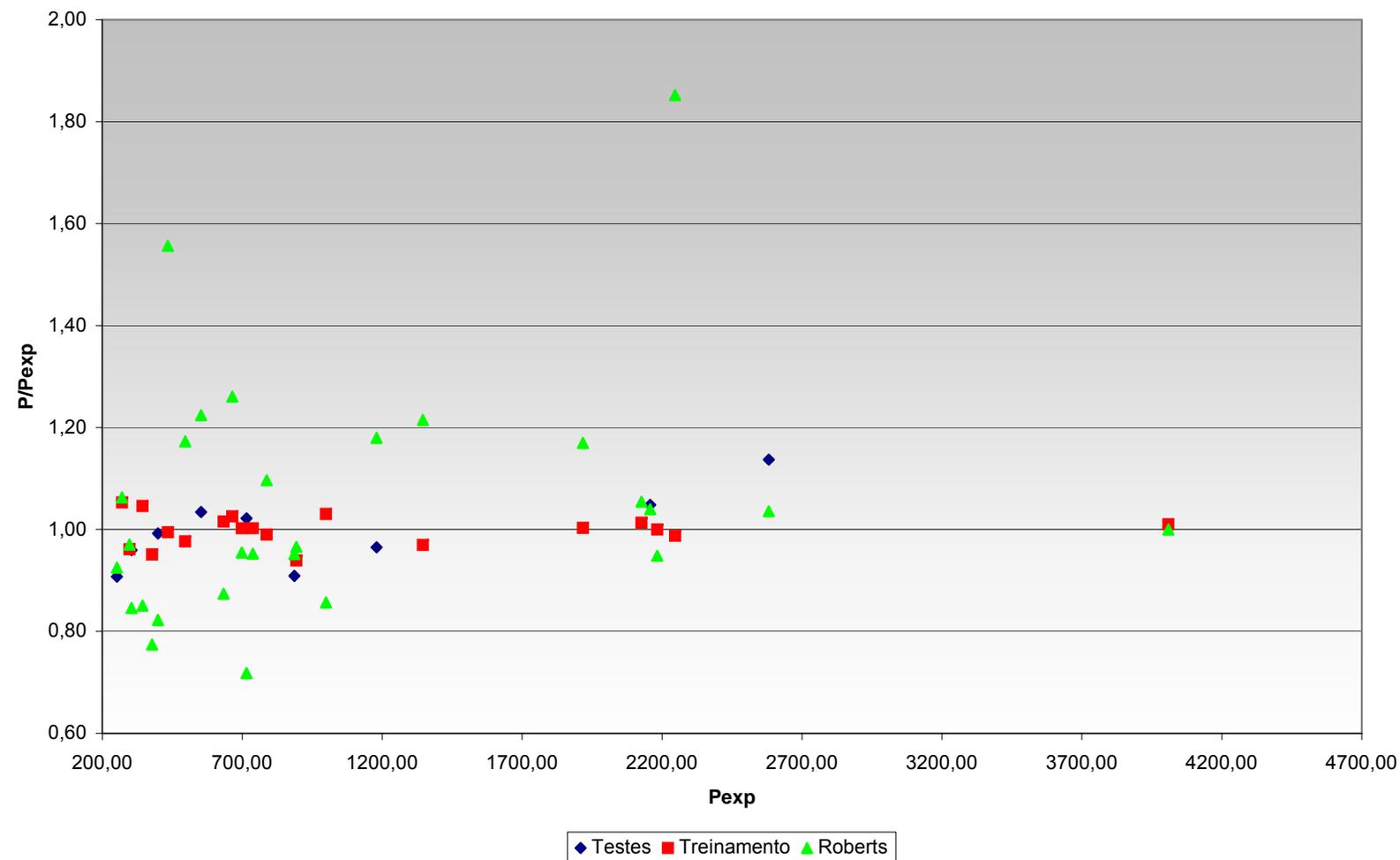
| Faixa 1: 0 a 100 | Faixa 2: 100 a 200 | Faixa 3: Maior que 200 |
|------------------|--------------------|------------------------|
| 1-0-0            | 0-1-0              | 0-0-1                  |



## Faixa 3 - 200 a 4010kN

- Erros percentuais de até 20%;
- 14 entradas - 46 dados de treinamento e teste;
- Redução para 11 entradas: c.  $t_w$ , a e h foram retirados.
- Fórmula de Lyse & Godfrey - Plastificação;
- Novo treinamento - Erro Máximo de 11,16% - Ajuste mais fino da fórmula.

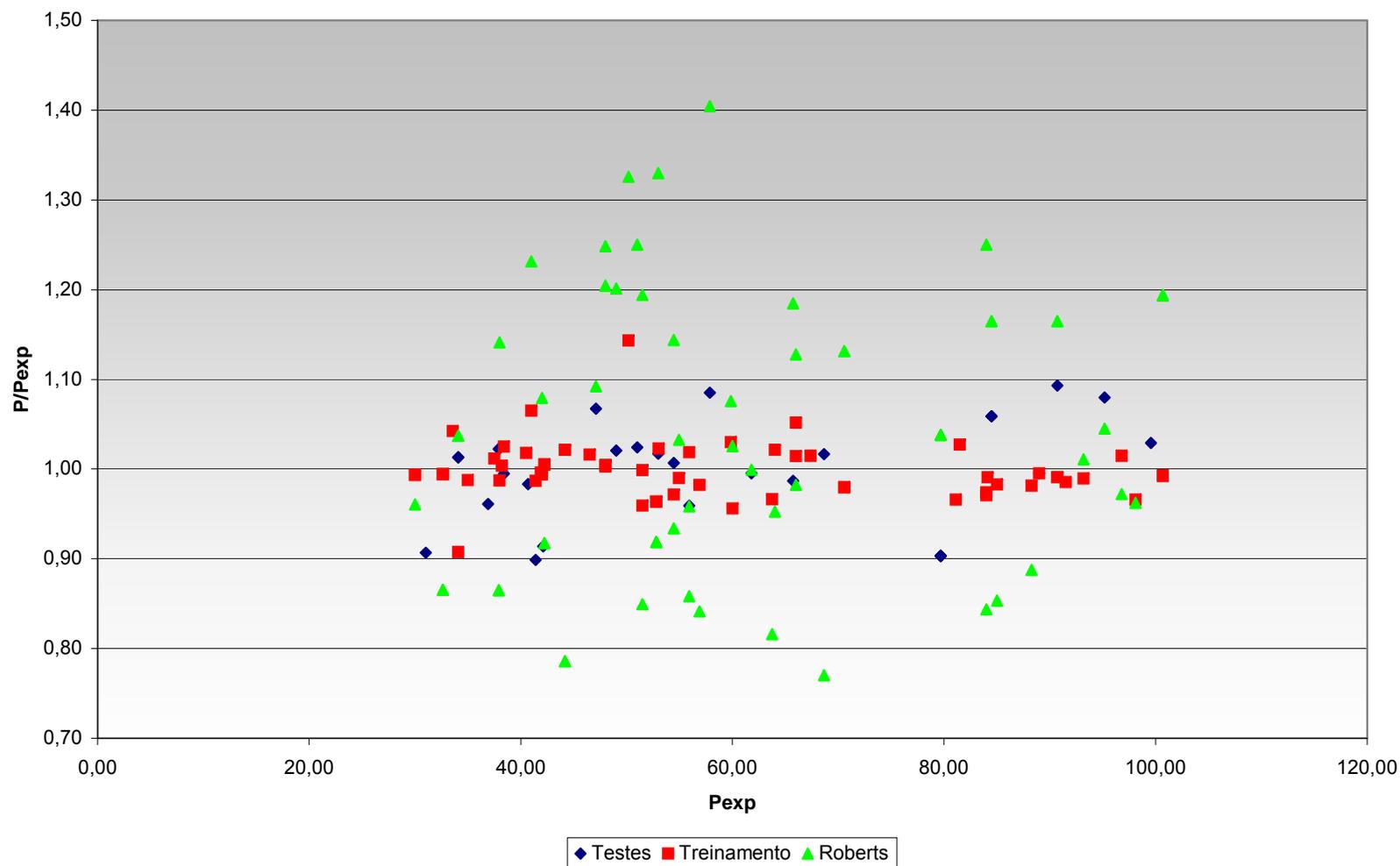
# Faixa 3 - 200 a 4010kN



# Faixa 1 - 30 a 100kN

- Erros de 17%;
- Inserção da fórmula de Roberts (1981) no treinamento;
- Erro percentual Máximo = 14,28%

# Faixa 1 - 30 a 100kN

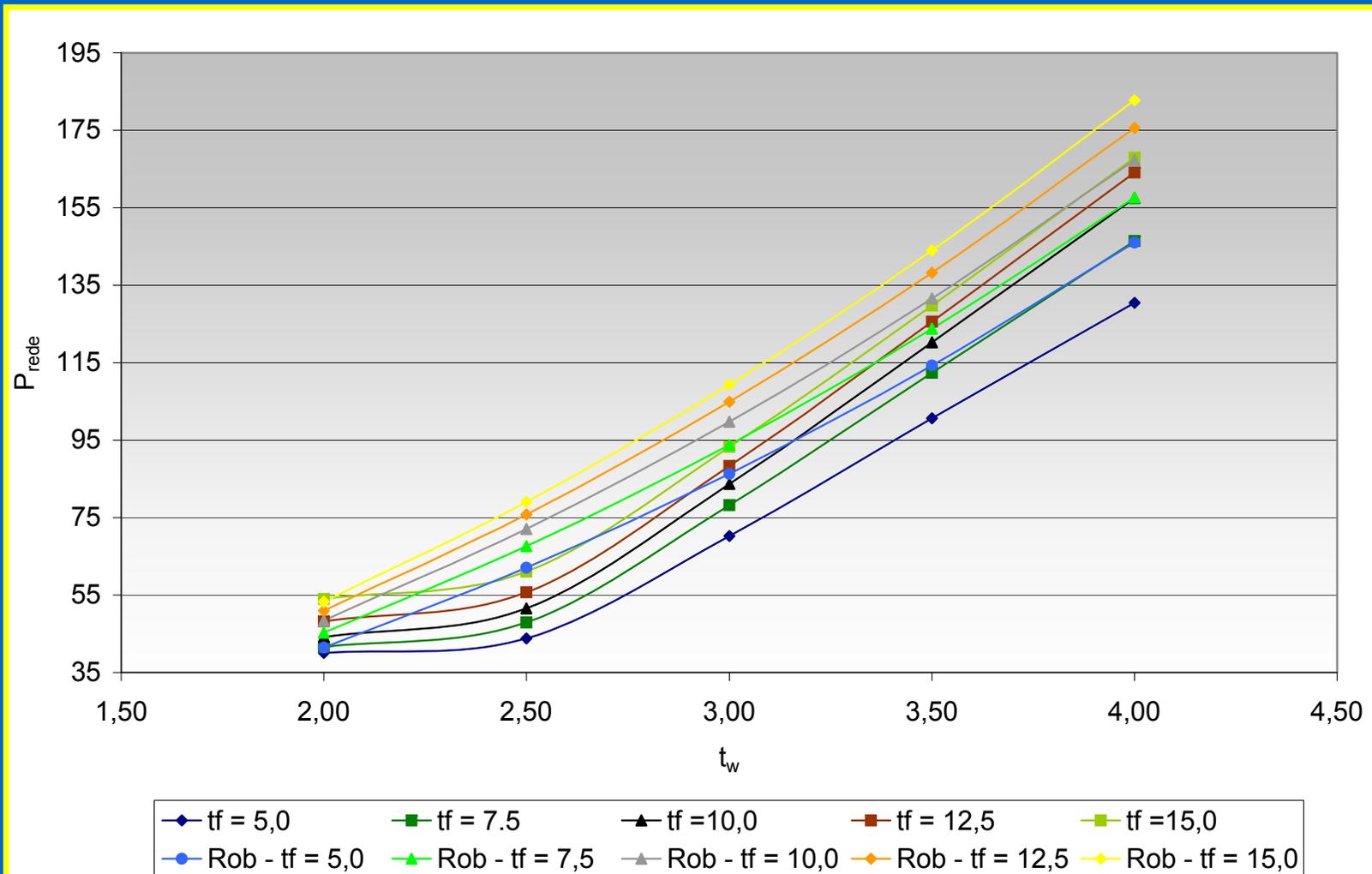


# Características das Redes

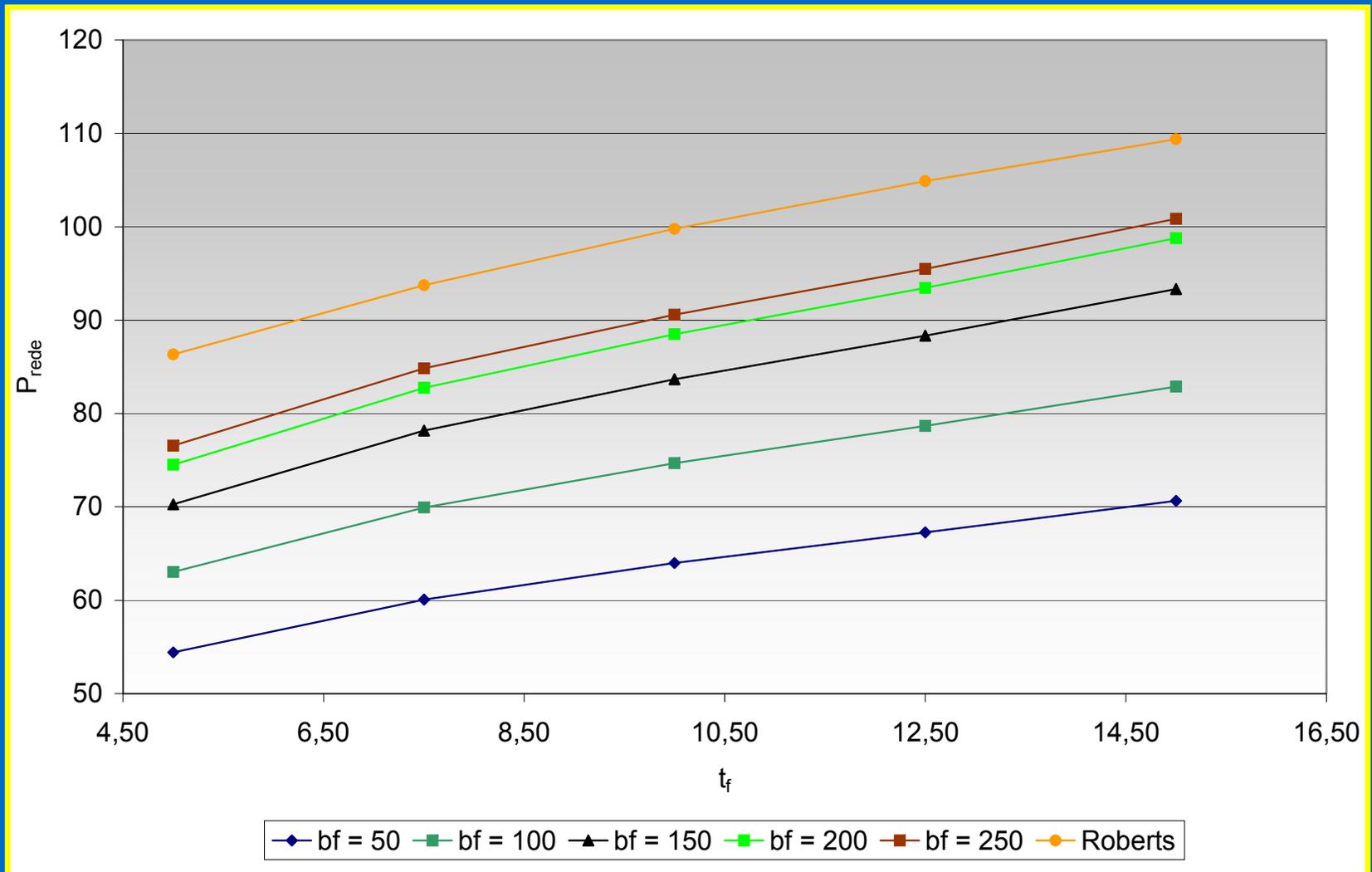
| Rede Neural                       | Classificação | Faixa 1      | Faixa 2      | Faixa 3      |
|-----------------------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| Entradas                          | 14            | 15           | 14           | 11           |
| Processadores na Camada escondida | 0             | 16           | 16           | 8            |
| Saídas                            | 3             | 1            | 1            | 1            |
| Tolerância (%)                    | 5             | 20           | 20           | 17           |
| Função de Ativação                | Sigmóide      | Sigmóide     | Sigmóide     | Sigmóide     |
| Nível de Ruído                    | Dados limpos  | Dados limpos | Dados limpos | Dados limpos |
| Transformação de Dados            | Superficial   | Superficial  | Superficial  | Superficial  |
| Seleção de Variáveis              | Nenhuma       | Nenhuma      | Nenhuma      | Nenhuma      |
| Busca da Rede                     | Exaustiva     | Exaustiva    | Exaustiva    | Exaustiva    |
| Erro percentual máximo            | -             | 14.28        | 12.96        | 11.16        |
| Desvio padrão                     | -             | 5.20         | 3.48         | 4.47         |
| Erro Percentual médio absoluto    | -             | 4.08         | 2.75         | 4.68         |
| Dados com erro inferior a 5%      | 100%          | 69.6%        | 86.7%        | 60.7%        |
| Dados com erro entre 5% e 10%     | -             | 24.1%        | 8.9%         | 32.1%        |
| Dados com erro entre 10% e 15%    | -             | 6.3%         | 4.4%         | 7.2%         |
| Percentual de Treinamento-Testes  | 70-30         | 70-30        | 70-30        | 70-30        |

- Pequeno número de dados para uma avaliação completa dos resultados.

# Resultados: Rede x Roberts



# Resultados: Rede x Roberts



A fórmula de Roberts não considera a variação da largura da mesa.

# Resultados: Rede x Roberts

- Bergfelt - A altura da viga tem influência secundária na carga última;
- A variação de  $h$  implica na variação da esbeltez da alma e na variação do fator de forma  $a/h$ ;
- A carga é mais afetada para  $a/h$  inferior a 2,5;
- A carga diminui com o aumento da esbeltez e cresce quando o fator de forma diminui.

# Principais Conclusões

- A inserção de parâmetros combinados melhorou o desempenho de todas as redes treinadas;
- A utilização de fórmulas como entradas no treinamento produziu um ajuste mais fino da função e reduziu o erro máximo;
- Na faixa 3 a redução do número de entradas fez com que a rede tivesse um número de conexões mais compatível com o número de dados disponíveis;

# Principais Conclusões

- Os erros das redes se mostraram inferiores aos fornecidos pelas fórmulas existentes;

# Conclusões da Análise Paramétrica - Faixas 1 e 2

- Os resultados da rede confirmaram as conclusões de Bergfelt, de que a altura da alma tem uma influência secundária na carga última, e que este parâmetro não deve ser avaliado isoladamente;
- O comprimento uniformemente carregado  $c$  influencia mais na carga última quando em vigas de mesas mais finas, ou seja, inferiores a 10 mm. Mas não se deve desvincular a espessura da mesa carregada da espessura da alma;

# Conclusões da Análise Paramétrica - Faixa 3

- A equação proposta por Lyse & Godfrey é muito conservadora na previsão da carga crítica de vigas sujeitas a cargas concentradas, embora o erro seja menor para fatores de forma iguais a 3;
- Para perfis de alma mais compacta, com esbeltez  $h/t_w$  inferior a 40, a influência da variação da razão  $c/h$  é mais significativa.

# Principais Conclusões

- A diferença de comportamento entre perfis de alma mais esbelta e perfis de alma compacta leva a conclusão de que o modelo de redes neurais com três faixas de previsão de carga se mostra adequado para este tipo de problema.