

## 15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

### DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA DO AÇO ESTRUTURAL A PARTIR DE VALORES MÉDIOS DE ENSAIO DE TRAÇÃO

LUCAS V. S. FELICIO<sup>1</sup>, CRISTIANE P. MARIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia civil, Bolsista PIVICT, IFSP, Campus Votuporanga, l.felicio@aluno.ifsp.edu.br.

<sup>2</sup> Professora Ma. da área de Edificações, IFSP, Campus Votuporanga, crismarin@ifsp.edu.br.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.01.02.03-0 Estruturas metálicas

**RESUMO:** A determinação da resistência característica do aço a partir de valores médios é um procedimento utilizado para estimar a capacidade de suporte deste material. A resistência característica é um parâmetro importante na engenharia estrutural, pois influencia diretamente o dimensionamento e a segurança das estruturas metálicas. A partir de ensaios de tração em corpos de prova metálicos, obtêm-se valores médios de tensão e respectiva deformação que denotam o comportamento do material. Com base nesses valores é determinada a resistência característica do aço, que é uma estimativa da resistência mínima que o aço pode fornecer em condições normais de utilização. Essa estimativa é obtida por meio de cálculos estatísticos, levando em consideração a dispersão dos resultados dos ensaios. Como este processo no Brasil é realizado pelas indústrias produtoras de aço, as normativas de construção civil não esclarecem como realizar esses ajustes estatísticos para a determinação da resistência característica. Na tentativa de compreender como esse cálculo é feito realizou-se o presente trabalho de pesquisa sendo feita uma análise de normativas internacionais para compreensão dos métodos estatísticos propostos por estas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estruturas metálicas; Ensaio de tração; Estatística; Resistência característica; Engenharia civil.

### DETERMINATION OF THE CHARACTERISTIC RESISTANCE OF STRUCTURAL STEEL BY USING MEAN VALUES OF TENSILE TESTING

**ABSTRACT:** The determination of the characteristic resistance of steel by using mean values is a procedure used to estimate the support capacity of the material. Characteristic resistance is an important parameter in structural engineering, as it directly influences the design and safety of steel structures. From tensile tests on metallic specimens, average values of stress and respective strain are obtained, which demonstrates the behavior of the material. Based on those values, the characteristic resistance of the steel is determined, which is an estimate of the minimum resistance that the steel can provide under normal conditions of use. This estimate is obtained through statistical calculations, taking into account the dispersion of the results of the tests. As this process in Brazil is made by the steel-producing industries, the civil construction standards does not clarify how to make these statistical adjustments to determine the characteristic resistance of steel. In an attempt to understand how this calculation is made, the present research was carried out, with an analysis of international standards for a major understanding of the methods proposed.

**KEYWORDS:** Steel structures; Tensile testing; Statistics; Characteristic resistance; Civil engineering;

## INTRODUÇÃO

A concepção de uma estrutura na engenharia civil depende intimamente do material escolhido para a elaboração da construção. Isto porque as propriedades físicas e mecânicas do material a ser utilizado são parâmetros fundamentais no dimensionamento, buscando determinar o melhor uso no projeto, de acordo com os recursos econômicos disponíveis e proporcionando segurança à população.

Assim, na área de estruturas metálicas, as edificações são elaboradas seguindo normativas que se certificam que as construções sejam confiáveis, equilibrando a relação entre a resistência do aço e as ações que atuarão na estrutura.

Nesse contexto surge a necessidade de conhecer a resistência característica do material, grandeza fornecida e assegurada pelas siderúrgicas que comercializam aço para a construção civil. Entretanto, a metodologia para obtenção deste valor é muitas vezes oculta pelas bibliografias e normas relacionadas ao tema, por isso o presente projeto de iniciação científica foi desenvolvido, para entender como a resistência característica do aço é obtida, por meio de uma revisão bibliográfica de normativas e referenciais teóricos apropriados. Especificamente, como determinar a resistência característica do aço a partir de valores médios derivados de ensaios e testes de resistência.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O dimensionamento de estruturas metálicas consiste em avaliar as ações que atuarão na estrutura projetada, combiná-las a fim de se encontrar os esforços mais críticos que impactarão na edificação e majorá-los, em favor da segurança. Estes valores são comparados com a resistência do aço pelo método dos estados-limites.

Os estados-limites são uma composição de duas análises, o estado-limite último (ELU) e o estado-limite de serviço (ELS). O estado-limite último analisa o caso em que a estrutura colapsa devido a ruptura da seção ou ligação, perda de equilíbrio como corpo rígido ou plastificação total de um elemento estrutural e o estado-limite de serviço considera a perda da capacidade do elemento resistir aos esforços solicitantes determinados em projeto, devido a deformações e vibrações excessivas, por exemplo. Os métodos utilizam uma série de coeficientes de segurança para que a estrutura sempre desempenhe sua função com certo intervalo de confiança (Andrade, Vellasco, 2016).

A comparação no estado limite último é feita de modo que as tensões solicitantes de cálculo sejam menores que a resistência de cálculo, de acordo com a inequação abaixo:

$$R_d \geq S_d \quad (1)$$

Em que a resistência de cálculo ( $R_d$ ) é a minoração da resistência característica do material, para aumentar a confiabilidade do dimensionamento e  $S_d$  as solicitações majoradas (ABNT NBR 8800, 2008). A transformação de resistência característica para valores de cálculo é explicitada pela norma ABNT NBR 8800:2008, que determina um coeficiente de ponderação da resistência ( $\gamma_m$ ), levando em conta a variabilidade dos materiais envolvidos, a diferença entre o corpo de prova e a estrutura real e a incerteza na resistência característica em função de desvios construtivos e aproximações teóricas. Assim, nota-se que a transformação dos valores característicos para valores de cálculo é bem definida, porém a conversão da resistência média em resistência característica não é explícita.

O aço é uma boa alternativa para estruturas por ser um material dúctil, ou seja, um material que possui uma grande deformação antes do seu rompimento, característica essencial para elementos estruturais, visto que as deformações indicam que os esforços resistentes não estão sendo suficientes para manter a estabilidade da edificação (Ferraz, 2005). Relacionando as tensões das quais o material é sujeito e as consequentes deformações sofridas, obtém-se um gráfico que expressa o comportamento específico de um material dúctil. O gráfico é ilustrado na Figura 01:

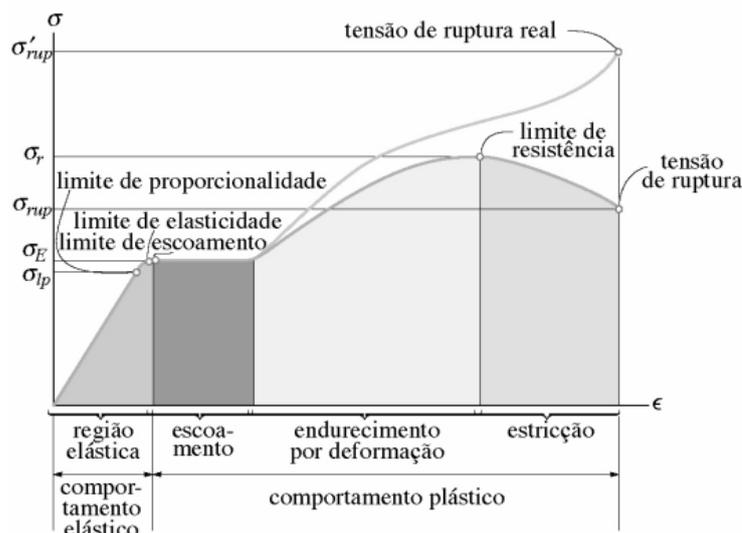


FIGURA 01. Curva de tensão-deformação característica de um material dúctil

Fonte: Buffoni, S. (2008, p. 4)

Por ser um material dúctil, a curva tensão-deformação do aço pode ser dividida em duas partes, a região elástica e a plástica. Na região elástica, as deformações do material não são permanentes, ou seja, ao cessar a força de tração, o material volta as suas dimensões originais e a relação entre a tensão e a deformação do material é linear. Na região plástica, as deformações são permanentes, por conta do rearranjo que o material sofre devido às tensões mais elevadas (Pfeil, 2008).

Ainda, na região elástica, é definida uma lei matemática que expressa essa relação linear entre a tensão e a deformação, chamada de Lei de Hooke, na qual o coeficiente angular da reta obtida é o módulo de elasticidade do material, conforme abaixo.

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (2)$$

Ao final da região elástica, a lei de Hooke deixa de representar o comportamento do aço e o módulo de elasticidade passa a ser variável. Nesse ponto, o aço entra em escoamento, ou seja, a rede do material começa a se rearranjar, deformando permanentemente, e assim sendo capaz de resistir a maiores valores de tensão até a sua ruptura (Hibbeler, 2010).

A resistência de um material é definida como sendo a tensão correspondente para que o material atinja pontos específicos da curva, como a tensão de escoamento (fim do regime elástico) e a tensão de ruptura. A resistência característica, para o aço, é representada pelos valores de tensão da curva que tem a probabilidade de ocorrerem em 95% dos ensaios, em um lote de material (ABNT NBR 8800, 2008).

Experimentalmente, a curva de tensão x deformação do aço é feita utilizando o ensaio de tração para obter valores médios de resistência de cada corpo de prova testado. A norma ABNT NBR 6892-1:2013 explicita sobre a realização de ensaios de tração em materiais metálicos à temperatura ambiente, para que seja possível analisar o comportamento do aço e gerar o gráfico de tensão x deformação com um bom intervalo de confiança, porém, não revela como obter a resistência característica a partir das amostras médias.

Assim, é necessário recorrer ao *Eurocode*, conjunto de normas europeias que visam unificar critérios e normativas de cálculo e dimensionamento de estruturas. O *Eurocode 0* (“EN 1990: *Eurocode - Basis of structural design*”, 2002) possui um anexo que explicita como os valores de cálculo podem ser obtidos a partir de ensaios, o anexo D (“*Annex D: Design assisted by testing*”). O anexo propõe tratamentos estatísticos e modelagens analíticas para obter os valores de resistência de projeto.

Primeiramente, a norma faz uma distinção entre os tipos de ensaios realizados, e assim, consequentemente, direciona aos procedimentos para a obtenção da resistência final do material. Os tipos de ensaios abrangidos pela norma são:

A. Ensaios para estabelecer a resistência última ou propriedades de serviço de estruturas para dadas condições de carregamentos, como carregamentos de fadiga ou de impacto;

B. Ensaios para obter propriedades específicas do material, como resistência, utilizando procedimentos de teste específicos, como tração, compressão ou flexão;

C. Ensaios para reduzir incertezas em modelagens de efeitos de carregamentos; por exemplo, por ensaios de túneis de vento;

D. Ensaios para reduzir incertezas em parâmetros usados em modelos de resistência; por exemplo, para testar membros estruturais ou ligações de membros estruturais;

E. Ensaios de controle de qualidade do produto entregue ou a consistência da produção característica; por exemplo, testes de cabos para pontes;

F. Ensaios realizados durante a execução afim de obter informações requeridas para parte da execução; por exemplo, ensaio de abatimento;

G. Ensaios de controle para verificar o comportamento de uma estrutura real ou membros estruturais; por exemplo, para encontrar deformações elásticas, frequências vibracionais ou recalque;

Assim, para os casos A, B, C, e D, os valores de cálculo podem ser obtidos a partir de métodos estatísticos aplicados aos resultados dos ensaios. Os demais casos podem ser considerados como testes de aceitação onde nenhum resultado dos testes está disponível no momento do projeto.

Se tratando da determinação dos valores de cálculo, estes podem ser obtidos por dois métodos, denominados A e B pela normativa. O método A consiste em estimar o valor de cálculo por meio de um valor característico, assim como a norma NBR 8800:2008 aponta na sua constituição. O método B indica uma determinação direta da resistência de cálculo.

Outra distinção importante a ser feita para os procedimentos da norma é, se o valor de cálculo será derivado por meio da avaliação de uma propriedade única que representa a resistência do material, como as tensões de escoamento e ruptura, ou se é avaliada por meio de uma modelagem de resistência baseada em outras propriedades do material, como temperatura e geometria.

O fluxograma da Figura 2 demonstra os possíveis procedimentos estatísticos desenvolvidos pela norma:

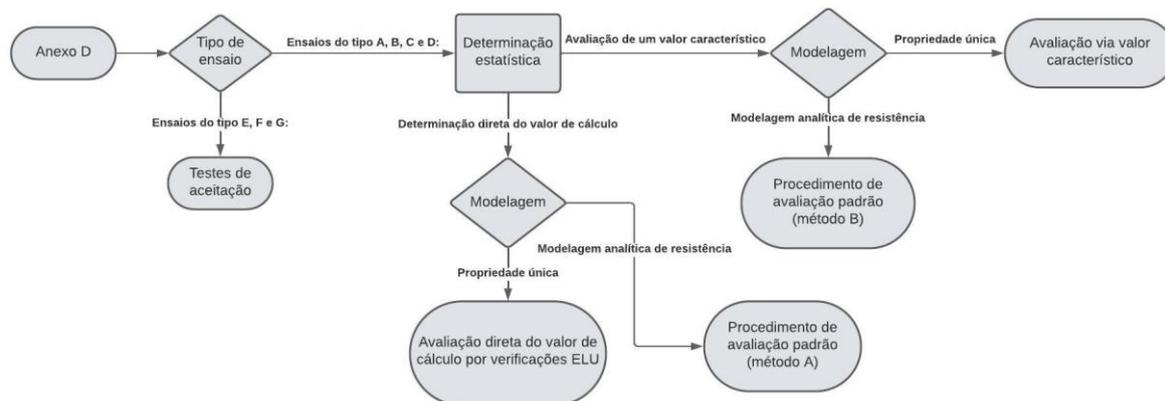


FIGURA 02. Fluxograma de soluções propostas pelo anexo D da EN 1990.

Fonte: Próprio autor (2024)

Visto que o projeto de pesquisa realiza um estudo sobre a resistência característica do aço a partir de valores médios de resistência em ensaios de tração, o método estatístico com destaque é o de avaliação via valor característico, a partir de uma propriedade única do aço, os valores de tensão obtidos no ensaio.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A solução proposta pelo anexo é utilizar um método estatístico que consiste em avaliar uma propriedade única X, que pode representar a resistência do material, ou uma propriedade contribuinte para a sua resistência. Assim, o valor de cálculo da propriedade X pode ser encontrado de acordo com a expressão abaixo:

$$X_d = \eta_d \cdot \frac{X_{k(n)}}{\gamma_m} \quad (3)$$

Onde,  $\eta$  é um fator de conversão dependente do tipo de ensaio realizado e tipo de material. O valor característico é dado ainda, pela equação abaixo:

$$X_{k(n)} = m_X \cdot (1 - k_n \cdot V_X) \quad (4)$$

Em que,  $m_X$  representa a média dos valores de ensaio,  $V_X$  é o coeficiente de variância do conjunto de dados e  $k_n$  pode ser obtido em uma tabela disponibilizada na norma e depende do número de amostragem do conjunto de dados ( $n$ ) e se o coeficiente de variância é conhecido ou não. Este coeficiente é responsável por manter a confiabilidade da resistência em um intervalo de confiança de 95% dos casos testados em um mesmo lote de material.

Caso o coeficiente de variância seja desconhecido, é possível estimá-lo de acordo com as expressões 5 e 6:

$$S_X^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum (x_i - m_X)^2 \quad (5)$$

Onde,  $S_X$  é o desvio padrão,  $x_i$  é o valor de uma amostra e  $n$  é o número de amostras.

$$V_X = \frac{S_X}{m_X} \quad (6)$$

A tabela para determinação dos valores de  $k_n$  para o valor característico de 5% é expressa a seguir:

TABELA 01. Valores de  $k_n$  em função da amostragem do ensaio (Fonte: adaptado da tabela D1 da EN 1990)

<b>n</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>∞</b>
<b><math>V_X</math> conhecido</b>	2,31	2,01	1,89	1,83	1,80	1,77	1,74	1,72	1,68	1,67	1,64
<b><math>V_X</math> desconhecido</b>	-	-	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

Nota-se que ao rearranjar a equação 4 de modo a expandir a relação de coeficiente de variância ilustrada na equação 6, obtêm-se uma expressão para a resistência característica em função da média e o desvio padrão do conjunto de dados, expressão esta que é comum a outros materiais, como a relação que descreve a resistência característica do concreto armado, utilizada pelas normas e bibliografias brasileiras (Libânio, 2007). A versão expandida da equação 4 é expressa abaixo:

$$X_{k(n)} = m_X - k_n \cdot S_X \quad (7)$$

Para evidenciar a similaridade da relação encontrada no Eurocode e nas normativas e referências brasileiras de concreto armado, é exposto abaixo a equação para determinação da resistência característica do concreto armado.

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,65 \cdot S \quad (8)$$

Como para o caso do concreto armado, a normativa define um número mínimo de ensaios a serem feitos, o coeficiente de majoração de desvio padrão para determinação da resistência característica é sempre 1,65, diferentemente da normativa europeia que permite diferentes números de corpos de prova, que são corrigidos pelo ajuste do coeficiente  $k_n$ . Quando o número de ensaios realizados ultrapassa 30 amostras, o coeficiente é então fixado em 1,64, assemelhando-se a normativa de concreto.

## CONCLUSÕES

Portanto, conclui-se que a confiabilidade das construções em estruturas metálicas é assegurada por normativas que preveem as incertezas às quais o material é submetido, por meio de métodos estatísticos rigorosos que garantem a segurança. As normativas brasileiras não explicitam como determinar a resistência característica, visto que este é um processo realizado pela indústria, entretanto, a normativa europeia alternativamente apresenta tal metodologia. Assim, foi atingido o objetivo geral da pesquisa, revisar a literatura bibliográfica e normativa do assunto e identificar como determinar a resistência característica de um conjunto de dados de ensaio de tração em materiais metálicos.

## CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

C.P.M. contribuiu com a definição da problemática do projeto, orientação e revisões textuais.

L.V.S.F. contribuiu com o desenvolvimento do projeto, metodologia aplicada, interpretação de resultados e redação do trabalho.

Todos os autores contribuíram com a revisão do trabalho e aprovaram a versão submetida.

## AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia pelo desenvolvimento do conhecimento.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008. Acesso em: 22 maio 2023.

ANDRADE, S.; VELLASCO, P. **Comportamento e projeto de estruturas de aço**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

BUFFONI, S. **Propriedades mecânicas dos materiais**. Rio de Janeiro: Universidade Federal Fluminense, 2008. Disponível em: [professores.uff.br/salete/wp-content/uploads/sites/111/2017/08/aula6.pdf](http://professores.uff.br/salete/wp-content/uploads/sites/111/2017/08/aula6.pdf) Acesso em: 22 maio 2023.

BRITISH STANDARD. **EN 1990**: Eurocode 0—Basis of structural design., 2002.

FERRAZ, H. O aço na construção civil. **Revista eletrônica de ciências**. São Carlos: Universidade de São Paulo, n. 22, 2005. Disponível em: [d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/56082035/O\\_ACO\\_NA\\_CONSTRUCAO\\_CIVIL-libre.pdf](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/56082035/O_ACO_NA_CONSTRUCAO_CIVIL-libre.pdf). Acesso em: 06 set. 2024.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson, 2010.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**: notas de aula. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2007. Disponível em: [d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/43906771/Apost\\_EESC\\_USP\\_Libanio-libre.pdf](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/43906771/Apost_EESC_USP_Libanio-libre.pdf). Acesso em: 30 jan. 2024.

PFEIL, W. **Estruturas de Aço**: dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008. 8. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

SANTOS, I. **Ligações metálicas**: análise do mecanismo de ruptura por cisalhamento de bloco. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Votuporanga, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ifsp.edu.br/handle/123456789/852>. Acesso em: 07 set. 2024.