

FACULDADE DE TECNOLOGIA DO ESTADO DE SÃO PAULO

FATEC-SP

Materiais

Wellington Rodrigues de Souza

**PREVISÃO DO LIMITE DE ESCOAMENTO CONVENCIONAL DE
AÇOS SAE 1006 LAMINADOS A QUENTE ATRAVÉS DO MÉTODO
DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA**

SÃO PAULO

2021

Wellington Rodrigues de Souza

**PREVISÃO DO LIMITE DE ESCOAMENTO CONVENCIONAL DE
AÇOS SAE 1006 LAMINADOS A QUENTE ATRAVÉS DO MÉTODO
DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA**

Trabalho apresentado a Faculdade de
Tecnologia de São Paulo, no curso de
Tecnologia de Materiais para a obtenção do
título de Tecnólogo em Materiais

Orientador: Prof. Me. Luis Fernando Maffei
Martins

SÃO PAULO

2021

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares por todo apoio, e paciência que sempre tiveram comigo por todos esses anos.

Aos professores do curso de Materiais da Fatec São Paulo, especialmente ao Profº Me. Luis Fernando Maffeis Martins, que apesar de todas as circunstâncias adversas, se desdobrou para ajudar da melhor maneira possível a realização do presente trabalho.

Por fim, e não menos importante, minha imensa gratidão aos amigos que fiz durante essa caminhada, e a todos que de alguma forma me ajudaram a alcançar mais essa conquista.

RESUMO

Os metais constituem o mais expressivo grupo de materiais de construção em toda cultura tecnologicamente avançada, graças às incontáveis aplicações nos vários campos da engenharia. O seu crescente emprego e relevância deve-se ao conhecimento adquirido sobre as suas propriedades e comportamento, sendo que, ainda há o constante estudo e aperfeiçoamento de novos métodos de fabricação, tratamento térmico e o desenvolvimento de novas ligas. Entretanto devido os materiais metálicos serem largamente utilizados, se faz necessário o desenvolvimento de novas técnicas que minimizem os gastos tempo e dinheiro para determinar certas propriedades mecânicas. O presente trabalho teve como objetivo prever o limite escoamento de aços laminados a quente utilizando-se da regressão linear múltipla para concretizar esse propósito. Utilizou-se bobinas de espessuras distintas desde 2,00 mm até 6,30 mm, de maneira geral a maioria das bobinas conseguiram ser representadas de forma efetiva pelo modelo de regressão linear múltipla, principalmente as bobinas de espessura de 3,00 mm que não apresentaram desvios significativos do limite de escoamento previsto, já outras bobinas como a de 3,20 mm algumas amostras não conseguiram ser explicadas pelo modelo de regressão linear múltipla, o que pode explicar esse comportamento são fatores externos que influenciam diretamente no limite de escoamento do material, como por exemplo variação de composição química e metodologia aplicada no ensaio de tração. Por fim, o modelo aqui aplicado pode sim ser utilizado para prever o limite de escoamento de bobinas laminadas a quente, sabendo que, futuramente uma metodologia similar poderá ser aplicada a outros materiais metálicos com o intuito de prever outras propriedades.

Palavras-chave: Aço. Regressão linear múltipla. Limite de escoamento

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de classificação dos materiais metálicos.(5).....	11
Figura 2 Diagrama Tensão-Deformação.....	13
Figura 3 Ilustração do dispositivo que executa ensaios de tensão-deformação sob tração.	15
Figura 4 Determinação do L_E através do método gráfico de deslocamento de 0,2%.....	16
Figura 5 Identificação dos pontos de limite de escoamento.	17
Figura 6 Imagem (I) ilustra um corpo de prova não submetido à tração, Imagem (II) representa o corpo de prova após exceder seu LRT.....	17
Figura 7 Ilustração de como é determinado o módulo de resiliência.	18
Figura 8 Esquema que através da curva tensão–deformação ilustra propriedades de fragilidade e ductilidade.	19
Figura 9 Exemplificação da propriedade tenacidade através do gráfico tensão-deformação.....	19
Figura 10 Efeito das adições de soluto no aumento do limite de escoamento pelo mecanismo de endurecimento por solução sólida.(7)	23
Figura 11 Ilustração simplificada do processo de laminação.....	24
Figura 12 Ilustração do aumento da largura.	25
Figura 13 Certificado de qualidade.	28
Figura 14 Estoque de bobinas.	29
Figura 15 Máquina para corte à plasma ESAB LHP 37.....	29
Figura 16 Amostra do material após a realização do corte.....	30
Figura 17 Guilhotina, maquinário para realização de cortes.....	30
Figura 18 Corpos de prova.	31
Figura 19 Máquina para ensaio tração EMIC capacidade de 100 kN.	31
Figura 20 Relatório do ensaio de tração.....	32
Figura 21 Gráfico do ensaio de tração.....	33
Figura 22 Caminho que ilustra onde se localiza a extensão Análise de Dados dentro do programa Excel.....	34
Figura 23 Exemplo dos dados fornecidos pela indústria.....	35
Figura 24 Demonstração da realização da regressão linear múltipla.	49

Figura 25 Exemplo dos resultados obtidos após a realização da regressão linear múltipla.....	49
Figura 26 Valores de coeficientes.....	50

Lista de tabelas

Tabela 1 Valores referentes a espessura de 2,00 mm.	36
Tabela 2 Valores referentes a espessura de 2,30 mm.	37
Tabela 3 Valores referentes a espessura de 2,60 mm.	39
Tabela 4 Valores referentes a espessura de 2,65 mm.	40
Tabela 5 Valores referentes a espessura de 3,00 mm.	42
Tabela 6 Valores referentes a espessura de 3,20 mm.	43
Tabela 7 Valores referentes a espessura de 6,30 mm.	47
Tabela 8 Indicação da quantidade de dados analisados.	48
Tabela 9 Apresenta resultados referente às bobinas de espessura de 2,00 mm.	51
Tabela 10 Apresenta resultados referente às bobinas de espessura de 2,30 mm.	52
Tabela 11 Apresenta resultados referente às bobinas de espessura de 2,60 mm.	54
Tabela 12 Apresenta resultados referente às bobinas de espessura de 2,65 mm.	56
Tabela 13 Apresenta resultados referente às bobinas de espessura de 3,00 mm.	58
Tabela 14 Apresenta resultados referente às bobinas de espessura de 3,20 mm.	59
Tabela 15 Apresenta resultados referente às bobinas de espessura de 6,30 mm.	64
Tabela 16 Resumo dos resultados obtidos.	65

Sumário

RESUMO	4
1. Introdução.....	10
2. Revisão da literatura.....	11
2.1. Aços	11
2.2. Ensaio de tração	12
2.3. Propriedades mecânicas dos materiais metálicos	16
2.3.1 Limite de escoamento	16
2.3.2 Limite de resistência à tração.....	17
2.3.3 Resiliência.....	18
2.3.4 Ductilidade	18
2.3.5 Tenacidade	19
2.4. A influência dos elementos de liga nas propriedades dos aços	20
2.4.1 Endurecimento por solução sólida	22
2.5. Processo de conformação plástica dos metais	24
2.5.1 Laminação.....	24
2.6. Regressão linear múltipla.....	26
3. Metodologia	28
3.1. Composição química.....	28
3.2. Procedimento para obtenção dos corpos de prova.....	29
3.3. Procedimento para coleta e análise de dados	34
4. Resultado e discussões.....	35
4.1. Dados de limite de escoamento e resistência à tração fornecidos pela indústria.....	35
4.2. Dados que foram submetidos a regressão linear múltipla.....	48
4.3. Resultados após a realização da regressão linear múltipla.	50
4.3.1 Resultados da bobina de 2,00 mm.....	51
4.3.2 Resultados da bobina de 2,30 mm.....	52

4.3.3	Resultados da bobina de 2,60 mm.....	54
4.3.4	Resultados da bobina de 2,65 mm.....	56
4.3.5	Resultados da bobina de 3,00 mm.....	58
4.3.6	Resultados da bobina de 3,20 mm.....	59
4.3.7	Resultados da bobina de 6,30 mm.....	64
5.	Conclusão.....	66
6.	Referências	68

1. INTRODUÇÃO

Os metais constituem o mais expressivo grupo de materiais de construção em toda cultura tecnologicamente avançada, graças às incontáveis aplicações nos vários campos da engenharia. O seu crescente emprego e relevância deve-se ao conhecimento adquirido sobre as suas propriedades e comportamento, sendo que, ainda há o constante estudo e aperfeiçoamento de novos métodos de fabricação, tratamento térmico e o desenvolvimento de novas ligas.(1)

No esquema de classificação das ligas ferro-carbono baseando-se no teor de carbono existem três tipos de ligas: ferro, aço e ferro fundido.(2)

O ferro comercialmente puro contém menos que 0,008%p C, já o aço pode ser definido como uma liga ferro-carbono, no qual o percentual em peso de carbono pode variar de 0,008 a 2,14%, diferencia-se dos ferros fundidos pois, apesar do mesmo também ser uma liga de ferro-carbono apresenta um percentual em peso de carbono acima de 2,14%.(2)

Para atender à necessidade imposta pelo avanço da tecnologia utiliza-se a conformação plástica dos metais com intuito de aperfeiçoar e ressaltar propriedades intrínsecas ou não desejadas no material.

Os principais processos de conformação plástica dos metais podem ser divididos em dois grupos: processos mecânicos, nos quais as modificações de forma são provocadas pela aplicação de tensões externas, e às vezes em altas temperaturas, mas sem a fusão do metal; e processos metalúrgicos, nos quais as modificações de forma podem estar relacionadas também às tensões externas, e às vezes em altas temperaturas, mas com a fusão do metal.(3)

Este trabalho tem como objetivo apresentar um método analítico com o intuito de prever o limite de escoamento de produtos laminados à quente através do modelamento matemático utilizando-se a técnica de regressão linear múltipla, e espera-se através desse método obter os resultados das propriedades mecânicas e confrontá-los com os dados experimentais com o propósito de validar o método.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Aços

O aço pode ser definido como uma liga ferro-carbono, no qual o percentual em peso de carbono pode variar de 0,008 a 2,14%, os ferros fundidos, que também são ligas de ferro-carbono, porém com percentual em peso de carbono acima de 2,14%.(2)

Existem diferentes tipos de aços que podem ser classificados de acordo com a sua composição química, microestrutura, propriedades mecânicas ou características de fabricação.(4)

De maneira simplificada os aços-carbono podem ser divididos em três classes distintas.

- Aços baixo carbono ($\%C < 0,25\%$)
- Aços médio carbono ($0,25\% < \%C < 0,50\%$)
- Aços alto carbono ($\%C > 0,50\%$)(4)

De forma geral, a resistência mecânica dos aços-carbono aumenta e a sua ductilidade diminui à medida que o teor de carbono aumenta.

Para melhor compreensão na Figura 1 temos um esquema de classificação dos materiais metálicos.

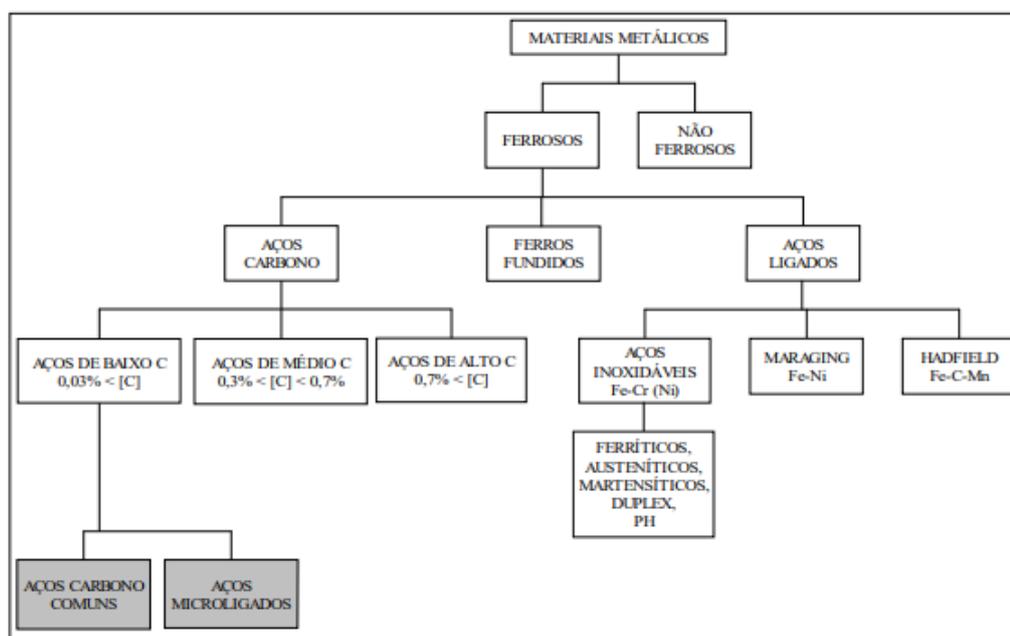


Figura 1 Esquema de classificação dos materiais metálicos.(5)

2.2. Ensaio de tração

Por se tratar de um ensaio de grande relevância para determinar propriedades importantes nos materiais, o ensaio de tração é um dos mais significativos no estudo e desenvolvimento de novos materiais, sendo assim, a abordagem desse ensaio no presente trabalho se faz extremamente importante para o entendimento do estudo desenvolvido.

Existem grandezas intrínsecas aos materiais que se deve levar em conta quando se trata da realização do ensaio de tração, uma delas é a tensão, na literatura entende-se tensão como sendo a resistência interna de um corpo a uma força externa aplicada sobre ele, por unidade de área.(6)

Outra grandeza observada no ensaio de tração é a deformação, define-se deformação como sendo a variação de uma dimensão qualquer desse corpo, por unidade da mesma dimensão, quando esse corpo é submetido a um esforço qualquer. (6)

Tratando-se questões práticas podemos expressar matematicamente a tensão como sendo:

$$\sigma = \frac{Q}{S_0}$$

Onde:

σ = Tensão, Q = Força aplicada e S_0 = Secção transversal

Dito isso, a determinação da deformação é extremamente importante para que se possa compreender como é realizado o ensaio de tração na sua totalidade.

Podemos expressar a deformação como:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Onde:

ε = Deformação, ΔL = Variação do comprimento e L_0 = Comprimento inicial

O processo de deformação em que a tensão e a deformação são proporcionais é chamada de deformação elástica; um gráfico tensão em função da deformação Figura 2 resulta em uma relação linear, a inclinação desse segmento de reta corresponde ao módulo de elasticidade.(2)

A deformação elástica não é permanente, ou seja, quando a carga aplicada é retirada, a peça retorna a sua forma original.(2)

Em uma escala atômica, a deformação elástica microscópica se manifesta como pequenas alterações no espaçamento interatômico e no estiramento das ligações interatômicas, ou seja, a magnitude do módulo de elasticidade mensura a resistência à separação de átomos adjacentes, isto é, as forças de ligação entre os átomos.(2)

A transição do comportamento elástico para o plástico é gradativa para a maioria dos metais; ocorre uma curvatura no começo da deformação plástica que é acentuada mais rapidamente com o aumento da tensão.(2)

De um ponto de vista microscópico, a deformação plástica corresponde à quebra de ligações entre os átomos vizinhos originais, seguida pela formação de novas ligações com novos átomos vizinhos, sendo que, com a remoção da tensão, eles não retornam às suas posições originais.(2)

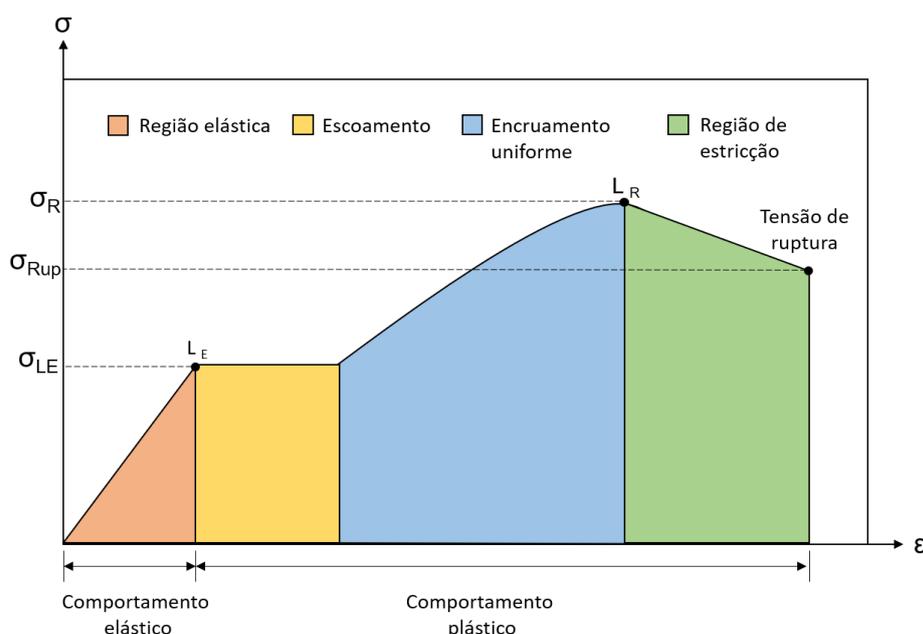


Figura 2 Diagrama Tensão-Deformação.

Para a grande maioria dos metais submetidos a uma tensão de tração em níveis relativamente baixos, a tensão e a deformação são proporcionais entre si, isto é uma característica dos metais quando eles estão sofrendo deformação elástica.(2)

E é representado por:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Onde:

σ = Tensão, E = Módulo de elasticidade e ε = Deformação

Essa relação acima citada é conhecida como *Lei de Hooke* o módulo de elasticidade E (com unidades de Pa ou Psi) também é conhecido como *módulo de Young*.(2)

Ainda existem duas propriedades mecânicas que podem ser determinadas através da realização do ensaio de tração, que são elas, o alongamento que é uma medida da ductilidade dos metais (com unidade %) e a estrição também (com unidade %).(6)

O alongamento pode ser calculado por:

$$A = \left(\frac{L - L_0}{L_0} \right) \cdot 100$$

Onde:

A = Alongamento, L_0 = Comprimento inicial e L = Comprimento final

Já estrição é medida pela diminuição de secção transversal do corpo de prova após a ruptura.(6)

A estrição é dada por:

$$\varphi = \left(\frac{S_0 - S}{S_0} \right) \cdot 100$$

Onde:

φ = Estrição, S_0 = Secção transversal inicial e S = Secção transversal final

Por fim, pode-se descrever a execução do ensaio de tração de forma simplificada em algumas etapas, já que a metodologia pode ter alguma variação de acordo com a máquina e os periféricos que estão acoplados a ela.

Etapa 1 – Retirada de amostra para confecção dos corpos de prova.

Etapa 2 – Confecção dos corpos de prova seguindo as normas que definem as dimensões e outros parâmetros que variam de acordo com o tipo do material.

Etapa 3 – Realização das medidas dos corpos de prova, juntamente com a adição desses dados no computador acoplado a máquina de ensaio de tração.

Etapa 4 – Posicionar o corpo de prova na máquina juntamente com o extensômetro e executar o ensaio de tração.

Etapa Final – Retirada do corpo de prova para análise, e avaliação do relatório técnico fornecido pela máquina de ensaio de tração.

Tendo em vista de forma resumida as etapas da realização do ensaio de tração, na Figura 3 observa-se a disposição dos elementos do ensaio.

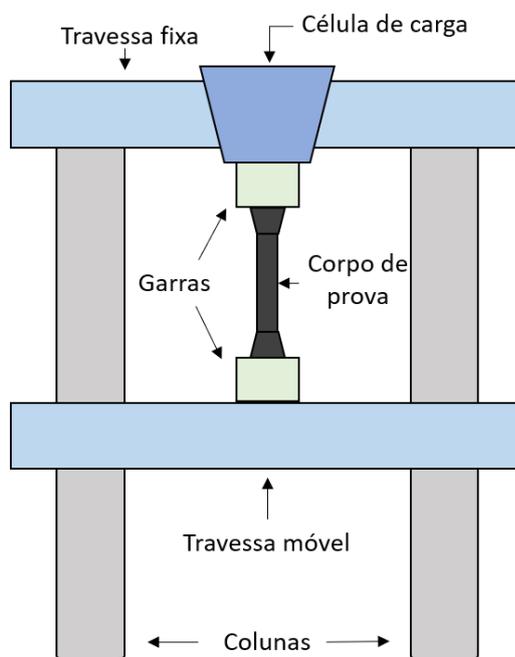


Figura 3 Ilustração do dispositivo que executa ensaios de tensão-deformação sob tração.

2.3. Propriedades mecânicas dos materiais metálicos

Muitos materiais, são submetidos a forças ou cargas durante a sua vida útil. Em tais situações é necessário conhecer características intrínsecas do material e projetar o componente a partir do qual ele é feito de maneira que qualquer deformação resultante não seja excessiva e não acarrete a sua fratura. O comportamento mecânico de um material reflete a relação entre sua resposta ou deformação a uma carga ou força aplicada. Propriedades mecânicas importantes para o projeto são ductilidade, resiliência, tenacidade, dureza, limite de escoamento e limite de resistência à tração.(2)

2.3.1 Limite de escoamento

Há ainda outra particularidade dos materiais bastante importante a ser abordada, que é o limite de escoamento, na literatura entende-se limite de escoamento como sendo a menor tensão que inicia-se a deformação plástica do material, ou seja, é o desvio da linearidade na curva tensão-deformação.(2)

Para evitar a determinação do limite de escoamento de forma arbitrária, é comumente usado o método de pré-deformação de 0,2%, essa técnica utiliza-se de um gráfico tensão-deformação no qual após o deslocamento 0,2% ser aplicado, traça-se uma paralela a curva tensão-deformação e onde a paralela traçada encontrar a curva do gráfico, esse ponto será o limite de escoamento, na Figura 4 temos a ilustração desse método.(2)

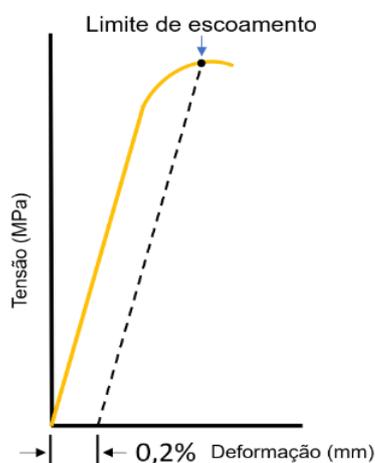


Figura 4 Determinação do L_E através do método gráfico de deslocamento de 0,2%.

Existem alguns materiais que possuem o ponto do limite de escoamento de fácil identificação como é ilustrado na Figura 5 há ainda dois pontos distintos que podem ser identificados no gráfico tensão-deformação, nomeados de limite de escoamento superior e inferior.(2)

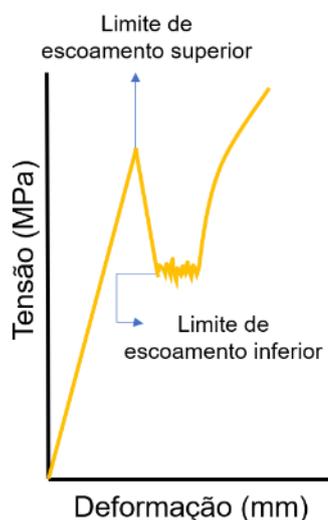


Figura 5 Identificação dos pontos de limite de escoamento.

2.3.2 Limite de resistência à tração

Como mencionado na literatura, sabe-se que o limite de resistência à tração (LRT) é o ponto na curva tensão-deformação que corresponde a máxima tensão suportada por um material sob tração, e se essa tensão for mantida o material fraturará, isto é, quando o material é submetido a tensões que atingem o limite de resistência à tração e são mantidas essas tensões, caso o material tenha tendência a apresentar fratura predominantemente dúctil é possível notar o alongamento e também estrição da seção transversal do mesmo. Através da Figura 6 é possível acompanhar as mudanças de geometria acima citadas.(2)

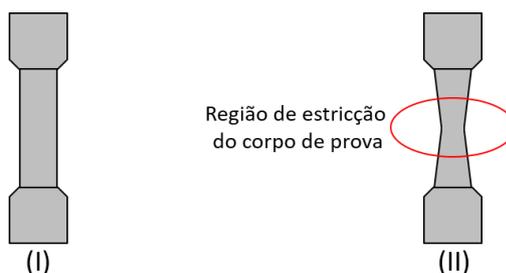


Figura 6 Imagem (I) ilustra um corpo de prova não submetido à tração, Imagem (II) representa o corpo de prova após exceder seu LRT.

2.3.3 Resiliência

Outra propriedade bastante relevante e analisada é a resiliência, sabe-se que, a resiliência é a capacidade de um material absorver energia no regime elástico, e depois, com a remoção da carga, permitir a recuperação dessa energia. Por convenção determinou-se o módulo de resiliência, que é unidade de energia por tempo, calculando a área do triângulo situada no regime elástico do material, assim como ilustrado na Figura 7 onde σ_i e ϵ_i são respectivamente tensão e deformação no limite de escoamento. Observa-se a manifestação dessa propriedade no comportamento elástico das molas.(2)

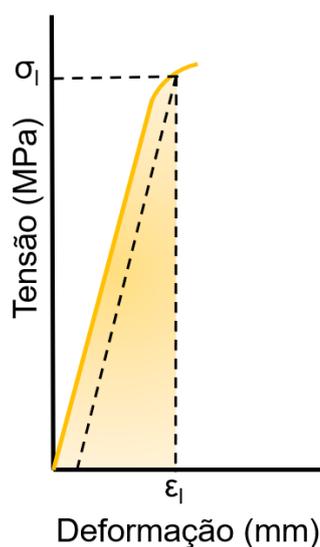


Figura 7 Ilustração de como é determinado o módulo de resiliência.

2.3.4 Ductilidade

A ductilidade faz parte do grupo de propriedades mecânicas mais importantes e estudadas quando se trata do desenvolvimento de novos materiais. Entende-se como ductilidade, o quanto o material consegue se deformar plasticamente até a fratura, como é apresentado na Figura 8, ou seja, materiais que se deformam pouco plasticamente ou não há deformação plástica são considerados materiais frágeis.(2)

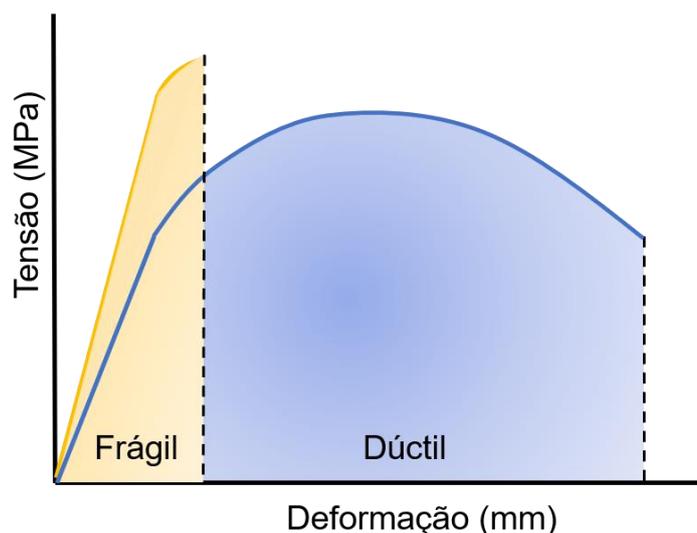


Figura 8 Esquema que através da curva tensão–deformação ilustra propriedades de fragilidade e ductilidade.

2.3.5 Tenacidade

Mais uma propriedade a ser abordada é a tenacidade, entende-se como tenacidade como sendo a capacidade de um material absorver energia até fratura. Pode-se mensurar essa propriedade executando-se um ensaio de tração, onde determina-se a tenacidade calculando a área sob a curva tensão-deformação até o ponto da fratura. Vale lembrar que para o material ser considerado tenaz ele precisa se mostrar resistente e dúctil, como pode ser observado na Figura 9.(2)

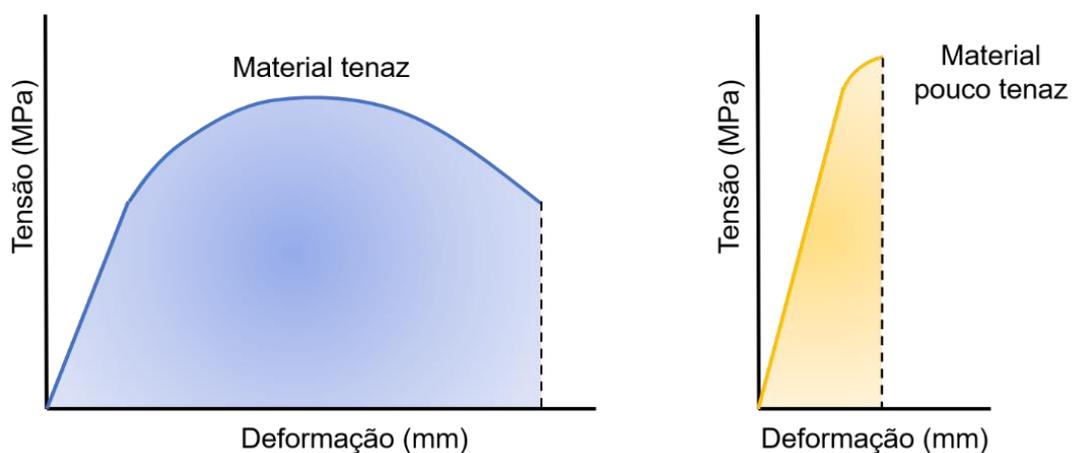


Figura 9 Exemplificação da propriedade tenacidade através do gráfico tensão-deformação.

2.4. A influência dos elementos de liga nas propriedades dos aços

Sabe-se que os aços-carbono apresentam diversas limitações, ainda mais quando se desejam propriedades especiais de resistência à corrosão, resistência ao calor, resistência ao desgaste etc. Para esses casos são necessários o uso dos aços-ligas.(1)

Diante das limitações atreladas aos aços-carbono se faz necessário o uso de elementos de liga que tem como objetivo adicionar, atenuar ou salientar propriedades desejadas para as mais diversas aplicações.

Dito isso, faz-se necessário o conhecimento dos principais elementos de liga e suas funções associado ao aço.

- Alumínio – Desoxidante eficiente, restringe o crescimento de grão, e serve de elemento de liga nos aços para nitretação;
- Cromo – Aumenta a resistência à corrosão e à oxidação, aumenta a endurecibilidade, melhora a resistência a altas temperaturas e aumenta a resistência ao desgaste (quando associado à altos teores de Carbono);
- Cobalto – Essencialmente contribui com o aumento da dureza à quente pelo endurecimento da ferrita;
- Manganês – Contrabalança a fragilidade provocado pelo Enxofre;
- Molibdênio – Eleva a temperatura de crescimento de grão da austenita, produz maior profundidade de endurecimento, eleva a dureza à quente e a fluência, melhora a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis e forma partículas resistentes à abrasão;
- Níquel – Aumenta a resistência dos aços recozidos, aumenta a tenacidade de aços-perlíticos (sobretudo a baixas temperaturas);
- Fósforo - Aumenta a resistência de aços de baixo teor de carbono, aumenta à resistência a corrosão e aumenta a usinabilidade em aços de usinagem fácil;
- Silício – Desoxidante, aumenta à resistência à oxidação e aumenta a resistência de aços pouco ligados;

- Titânio – Reduz a dureza martensítica e a endurecibilidade em aços ao Cromo com teor médio de Cromo e impede a formação de austenita em aços com alto teor de Cromo;
- Tungstênio – Forma partículas duras e resistentes ao desgaste em aços-ferramenta e promove dureza e resistência a altas temperaturas;
- Vanádio – Eleva a temperatura de crescimento de grão da austenita (promove refino do grão), aumenta a endurecibilidade (quando dissolvido) e resiste ao revenido e causa acentuado endurecimento secundário.(1)

Resumidamente a introdução de outros elementos de liga nos aços-carbono é feita com o intuito de destacar um ou mais dos seguintes efeitos:

1. Aumentar a dureza e a resistência mecânica;
2. Conferir resistência uniformemente em peças de grandes dimensões;
3. Conferir resistência à corrosão;
4. Aumentar a resistência ao calor;
5. Aumentar a resistência ao desgaste;
6. Aumentar a capacidade de corte;
7. Melhorar as propriedades elétricas e magnéticas.

O percentual em peso dos elementos de liga é relativamente baixo, não ultrapassando sua soma o valor de 5%.(1)

2.4.1 Endurecimento por solução sólida

O endurecimento por solução sólida advém da presença de átomos de elementos de liga solubilizados no reticulado do elemento solvente – no caso, o ferro (Fe). Com exceção do fósforo (P), todos os outros provocam dilatação do reticulado, ou seja, o endurecimento por solução sólida é alcançado quando ocorre a inserção de átomos de soluto em solução na rede de um solvente, através da substituição de um átomo de solvente por um átomo de soluto com tamanho equivalente (solução sólida substitucional) ou quando pequenos átomos de soluto ocupam posições intersticiais (solução sólida intersticial).(7,8)

A diferença de tamanho atômico entre o elemento e o ferro e a concentração de soluto tem efeito direto no limite de escoamento e no limite de resistência à tração do material. Para se atingir o endurecimento por solução sólida são comumente utilizados os elementos silício (Si) , manganês (Mn) e fósforo (P), devido ao grande aumento dos limites de escoamento em aços de baixo teor de carbono proporcionado por estes elementos.(7)

A magnitude do endurecimento é em decorrência de fatores alguns já citados, são eles:

- Diferença de tamanho entre os átomos de soluto e o de solvente;
- Perturbações na estrutura eletrônica, que podem estar presentes em termos da diferença no módulo de cisalhamento entre o soluto e solvente;
- Concentração do soluto.(8)

Em termos práticos, o efeito do endurecimento por solução sólida é diretamente proporcional ao teor em peso do soluto, ou seja, a presença destes átomos de soluto ocasiona a deformação da matriz cristalina do material, dificultando assim a movimentação das discordâncias no interior do cristal requerendo maior tensão para que ocorra movimento, a Figura 10 exemplifica essa condição.(7,8)

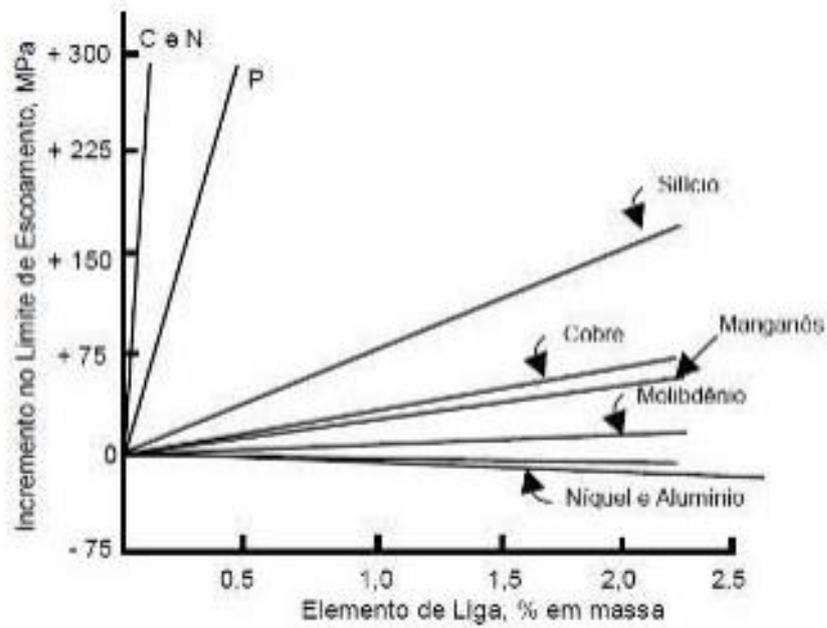


Figura 10 Efeito das adições de soluto no aumento do limite de escoamento pelo mecanismo de endurecimento por solução sólida.(7)

2.5. Processo de conformação plástica dos metais

Compreende-se o processo de conformação dos corpos metálicos como o processo de modificação da forma desse corpo metálico para outra forma definida, sendo assim, pode-se dividir esses processos em dois grupos distintos: processos mecânicos, no qual as modificações de forma são induzidas pela aplicação de tensões externas, e às vezes ocorrem em altas temperaturas, mas sem a fusão do metal e processos metalúrgicos, em que as modificações de forma também podem estar relacionadas às tensões externas, por vez podem ocorrer em altas temperaturas, mas com a fusão do metal.(3)

Um dos objetivos da conformação plástica dos metais é a alteração de características almejadas no material, tais como, dimensão e forma, propriedades mecânicas e condições superficiais.(3)

2.5.1 Laminação

A laminação é um dos processos de conformação mecânica mais amplamente difundidos no mundo, define-se a laminação como sendo a operação de conformação mecânica que reduz a secção transversal de chapa ou tarugo, como é mostrado na Figura 11 e por sua vez, aumentando o seu comprimento e largura, como pode ser visto na Figura 12; para se obter uma determinada dimensão (espessura) do corpo, deve-se submeter a peça a sucessivos passes através dos cilindros laminadores, com as distâncias entre si decrescentes; além disso, formas alongadas podem ser moldadas com o emprego de cilindros circulares dotados de canais.(3)

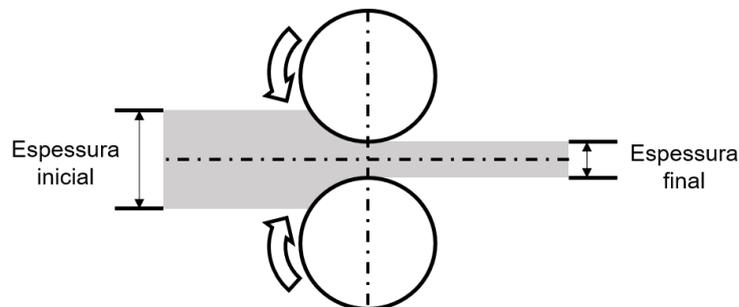


Figura 11 Ilustração simplificada do processo de laminação.

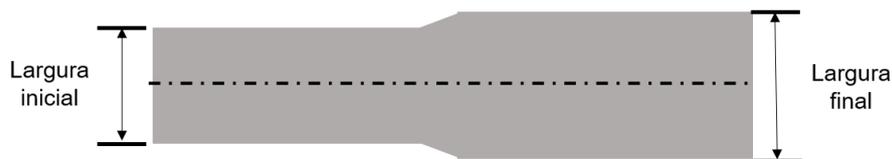


Figura 12 Ilustração do aumento da largura.

O processo de laminação divide-se em dois tipos diferentes, de acordo com a temperatura na qual o material será laminado, a frio ou a quente. Outros fatores como: dimensão, estrutura do material e propriedades mecânicas vão determinar qual será o melhor processo a ser aplicado, a frio ou a quente.(3)

Na laminação a quente a peça inicial é costumeiramente um lingote fundido de origem de lingotamento convencional, ou uma placa ou tarugo processado previamente em lingotamento contínuo; a peça intermediária e final assume, depois diversos passes pelos cilindros laminadores, as formas de perfis diversos (produtos não planos) ou chapas (produtos planos).(3)

A temperatura de laminação a quente se situa acima da temperatura de recristalização do metal da peça, a fim de minimizar a resistência a deformação plástica em cada passagem e favorecer a recuperação da estrutura do metal, evitando assim o aparecimento de trincas e o encruamento para os passes seguintes.(3)

Na laminação a frio a peça inicial para o processamento, nesse caso, é oriunda de um produto semiacabado (chapas), previamente laminado a quente. Por sua vez a temperatura de trabalho (temperatura ambiente) encontra-se abaixo da temperatura de recristalização, o material da peça apresenta uma maior resistência à deformação plástica e um aumento dessa resistência com a deformação (encruamento), dificultando assim elevadas reduções de área.(3)

O tratamento térmico de recozimento, entre uma e outra sequência de passes, se faz necessário caso haja no projeto, reduções de área muito elevadas, pode se tornar necessário também em função das propriedades exigidas do produto. A laminação a frio é aplicada, portanto, para as operações finais (de acabamento), quando as especificações do produto indicam a necessidade de acabamento superficial elevado, quando as tolerâncias dimensionais dos produtos devem ser muito restritas e produtos que serão pintados ou utiliza-se da própria superfície do produto à mostra.(3)

2.6. Regressão linear múltipla

A grande maioria das aplicações de análise de regressão envolvem casos em que há mais de um regressor. Esse tipo de modelo que contém mais de um regressor é denominado modelo de regressão linear múltipla. Para esse modelo tem-se a seguinte equação.(9)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \epsilon$$

Sendo que, Y é a variável dependente, o parâmetro β_0 é a interseção do plano, e é normalmente chamado β_1 e β_2 de coeficientes parciais de regressão, pois β_1 , mensura a variação esperada em Y por unidade de variação em x_1 , quando x_2 mantenha-se constante, e β_2 mede a variação esperada em Y por unidade de variação em x_2 , quando x_1 permanece constante.(9)

Geralmente a variável dependente ou de resposta, Y , pode estar relacionada a k variáveis independentes ou regressoras, por fim, ϵ é um termo que representa um erro aleatório.(9)

Dito isso, tanto no modelo de regressão linear como no modelo regressão linear múltipla existem alguns coeficientes que auxiliam na interpretação dos dados, o R^2 é um deles, é usado para quantificar a capacidade explicativa do modelo, ou seja, é uma medida da proporção da variação da variável resposta Y que é explicada pela equação de regressão quando estão envolvidas as variáveis independentes X_1, X_2, \dots, X_p .(10)

Sabe-se que,

$$0 \leq R^2 \leq 1.$$

Temos, no entanto, de ter atenção ao fato de que $R^2 \approx 1$ não significa que o modelo de regressão entrega um bom ajustamento aos dados, tendo em vista que a adição de uma variável aumenta sempre o valor deste coeficiente.(10)

Desta maneira, quando R^2 é elevado em determinados modelos, leva-nos a interpretações equivocadas de novas observações ou estimativas pouco confiáveis do valor esperado de Y . Por isso, concluímos que R^2 poderá não ser um bom indicador do grau de ajustamento do modelo.(10)

Sendo assim, é preferível utilizar o coeficiente de determinação ajustado, que é uma medida ajustada do coeficiente de determinação e que é “penalizada” quando são adicionadas variáveis pouco explicativas referente ao modelo.(10)

Define-se o coeficiente de determinação ajustado como,

$$R_a^2 = 1 - \left(\frac{n - 1}{n - (p + 1)} \right) (1 - R^2)$$

Ao contrário do coeficiente de determinação R^2 , o coeficiente de determinação ajustado, R_a^2 , não aumenta sempre quando adicionamos uma nova variável. Aliás, se adicionarmos variáveis com pouco poder explicativo este tende a decrescer. Sendo que, quando existe uma diferença significativa entre R^2 e R_a^2 , estamos diante de uma situação em que provavelmente tenham sido incluídas no modelo variáveis estatisticamente não significativas.(10)

Por fim, a regressão linear múltipla é uma técnica multivariada com o objetivo principal de obter uma relação matemática entre uma das variáveis estudadas (variável dependente ou resposta) e o restante das variáveis que descrevem o sistema, por sua vez reduzir o número de variáveis independentes como mínimo de perda de informação. Seu principal propósito, após encontrar a relação matemática é produzir valores para a variável dependente quando se tem as variáveis independentes.(11)

3. METODOLOGIA

3.1. Composição química

Para o desenvolvimento do presente estudo foram utilizados apenas bobinas laminadas a quente todas produzidas pela CSN (Companhia Siderúrgica Nacional, em Volta Redonda-RJ), o grau do aço utilizado foi o CSN LB DL 65, esse é um código interno usado pela CSN, ou seja, o grau do aço é o que indica a sua qualidade, sendo assim neste caso o aço em questão usado pela CSN, é equivalente ao SAE 1006.

Lembrando que todos os valores de composição química foram obtidos através dos certificados de qualidade como pode ser visto na Figura 13.

Companhia Siderúrgica Nacional		Número	Código Cliente	Contrato	Ordem Vendas	Data	Folha											
 Rodovia PR 423, nº 5500, Estado CEP 33785-000 Aracruz - PR - Brasil		000936944	15807		5298805/005006	28.12.2020	1 / 1											
Lista de Embarque e Certificado de Conformidade																		
Cliente MULTIACOES IND COM PROD TECNICOS LTD Avenida PAPA JOAO XXIII 1460 MOIRA VL MORMIA CEP:09370-800 SP BR Caixa Postal:			Nota Fiscal nº 009936944 Marca de Embarque Made in Brazil Produto CHATA AÇO FINA LAM.QUINTE BOBINA DECAP. Marcação Especial 344410/96 Especificação CSN LB DL 65 Data norma Qualidade Superfície 2 Cond Borda Universal Lam. Acabamento Sem AR Aplain. Restritivo Oleada Oleamento Simplificada - HI Embalagem															
-----Análise Química(%)-----																		
Placa	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	Sa	Al	N	Nb	V	Ti	B	C Eq.	
E86934	0,0390	0,3020	0,0130	0,0100	0,0080	0,0050	0,0060	0,0110	0,0040	0,0040	0,0580	0,004200	0,0010	0,0010	0,0030	0,0000	0,0933	
-----Propriedades Mecânicas / Magnéticas / Metalográficas-----																		
Lote	Corrida	Dureza	Dobras															
LB71400201	084857	52 HRC	1															
-----Produto Embarcado-----																		
Lote	Corrida	Placa	Espessura	Largura		Peso Líq.		Peso Br.										
LB71400201	084857	846934	2,300 MM	1160,0 MM		492,0 MM		10,310 TO 10,315 TO										
TOTAL: Lotes:		0001	Peso Líquido (MT):		10,310		Peso Bruto (MT):		10,315									

Figura 13 Certificado de qualidade.

3.2. Procedimento para obtenção dos corpos de prova



Figura 14 Estoque de bobinas.

Bobinas que estão previamente estocadas serão submetidas a testes que certificarão a sua qualidade, para que isso aconteça é retirada uma pequena amostra do material com o auxílio de uma cortadora à plasma como ilustrado na (Figura 15).



Figura 15 Máquina para corte à plasma ESAB LPH 37.



Figura 16 Amostra do material após a realização do corte.

Após a realização do corte do material da bobina como mostrado na Figura 16 esse material será levado a uma máquina conhecida como guilhotina, que tem o intuito de cortar o material no tamanho adequado dos corpos de prova, assim como pode ser visto na Figura 17.



Figura 17 Guilhotina, maquinário para realização de cortes.



Figura 18 Corpos de prova.

Tendo os corpos de prova no tamanho adequado para realização dos testes, os mesmos foram submetidos ao ensaio de tração, utilizando-se uma máquina de tração EMIC com capacidade de 100 kN, que pode ser vista na Figura 19.

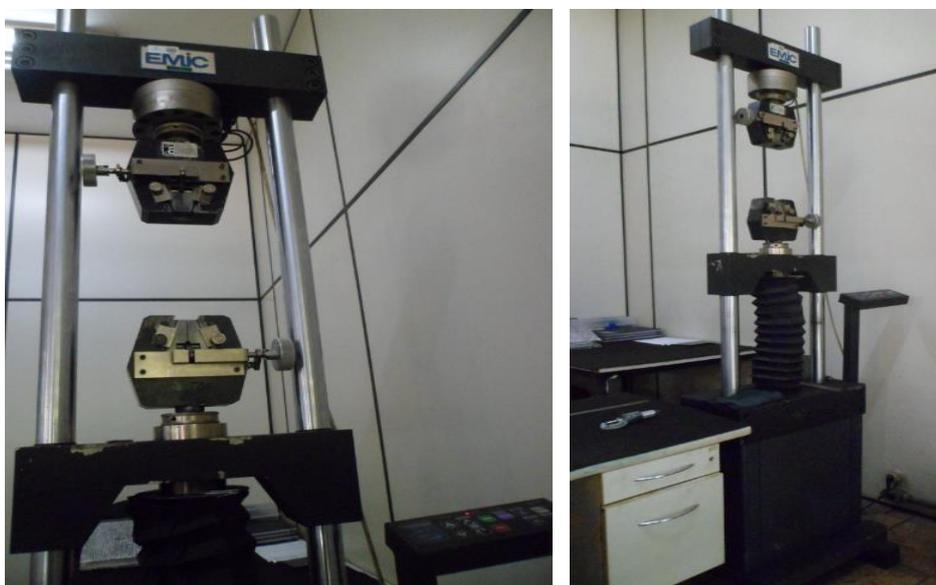


Figura 19 Máquina para ensaio tração EMIC capacidade de 100 kN.

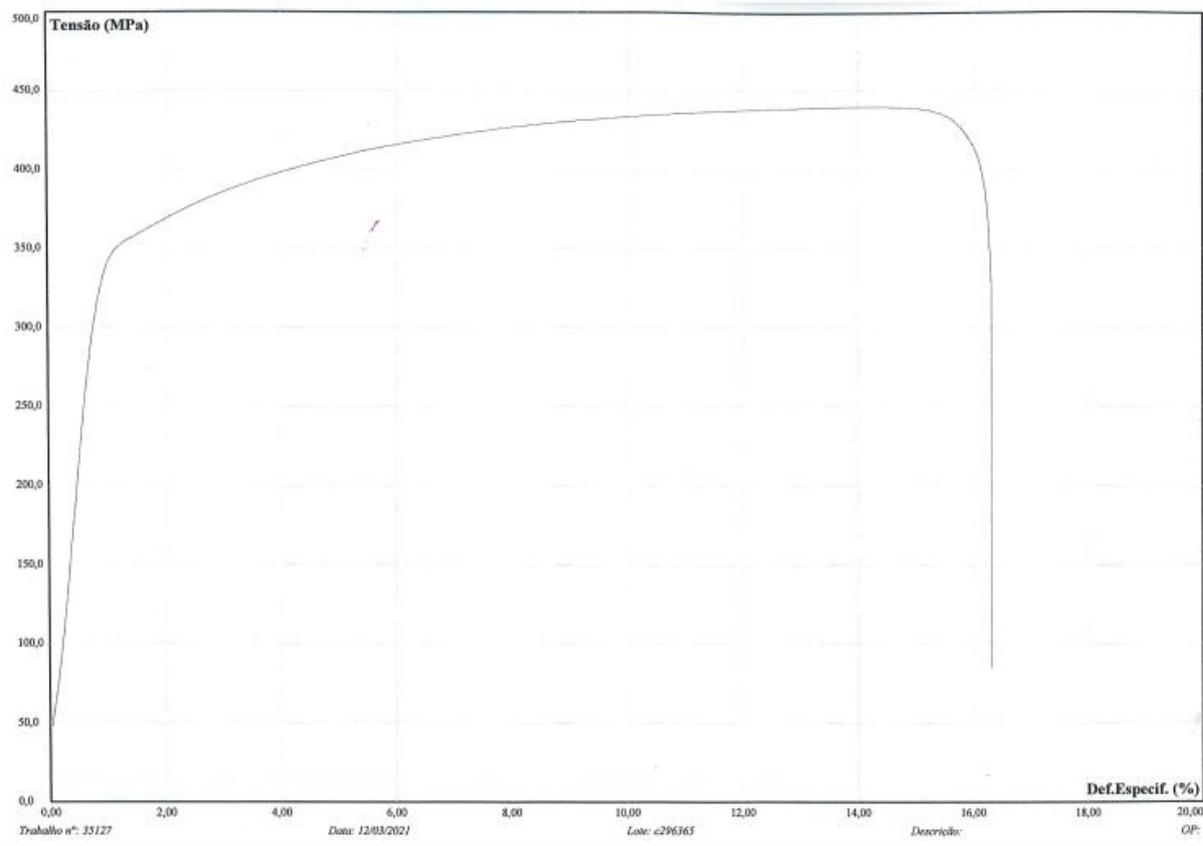


Figura 21 Gráfico do ensaio de tração.

3.3. Procedimento para coleta e análise de dados

A metodologia utilizada para o desenvolvimento deste estudo teve como objetivo selecionar as ferramentas disponíveis com o intuito de identificar qual seria o método que melhor satisfaz a necessidade de fazer a predição das propriedades mecânicas dos aços laminados a quente, sendo assim, a ferramenta escolhida foi o Excel fornecida pela Microsoft.

Um dos fatores preponderantes para a escolha do Excel foi a disponibilidade de uma extensão que possibilita o tratamento de dados através da extensão denominada Análise de Dados que pode ser visto na Figura 22.



Figura 22 Caminho que ilustra onde se localiza a extensão Análise de Dados dentro do programa Excel.

Tendo em mãos a ferramenta correta para a continuidade dos estudos, iniciou-se o processo de tratamento dos dados.

Etapa 1 – Foram obtidos dados reais de bobinas laminadas a quente diretamente da indústria (Multiaços Produtos Técnicos LTDA – Mauá)

Etapa 2 – Com o montante de dados obtidos, mostrou-se mais viável separar os valores por espessura que variam de 2,00; 2,30; 2,60; 2,65; 3,00; 3,20 e 6,30 mm, esses são os dados das bobinas que foram submetidos à realização da regressão linear múltipla.

Etapa 3 – Após a segregação, os dados de interesse foram submetidos a diversas interações pelo método de regressão linear múltipla, onde obteve-se valores de R^2 e R_a^2 que posteriormente foram avaliados para qualificar o quão o modelo de variáveis é significativo.

Etapa Final – Confrontou-se os valores de limite de escoamento obtidos através da regressão linear múltipla com os valores reais fornecidos pela indústria, estes que podem ser observados nos Resultados.

4. RESULTADO E DISCUSSÕES

4.1. Dados de limite de escoamento e resistência à tração fornecidos pela indústria

Os dados a seguir foram fornecidos pela Multiaços (Multiaços Produtos Técnicos LTDA – Mauá) e todos os dados de composição química informados pela CSN (Companhia Siderúrgica Nacional) através dos certificados de qualidade, os dados de ensaios mecânicos foram realizados pela própria Multiaços.

Na Figura 23 temos um exemplo de dados fornecidos pela Multiaços.

Grau do aço	Espessura	% Carbono	% Manganês	% Silício	% Fosforo	Enxofre	% Alumínio	% Nióbio	% Cobre	% Cromo	% Titânio	% Boro	% Vanádio	% Níquel	LE
CSN LB DL 65	2,00	0,04	0,29	0,01	0,02	0,01	0,05	0,00	0,01	0,01	0,001	0,00	0,00	0,01	240
CSN LB DL 65	2,00	0,03	0,28	0,01	0,02	0,01	0,05	0,00	0,01	0,01	0,001	0,00	0,00	0,01	236
CSN LB DL 65	2,00	0,04	0,31	0,01	0,01	0,01	0,05	0,00	0,01	0,01	0,001	0,00	0,00	0,00	280
CSN LB DL 65	2,00	0,03	0,28	0,01	0,02	0,01	0,05	0,00	0,01	0,01	0,001	0,00	0,00	0,01	307
CSN LB DL 65	2,00	0,04	0,28	0,01	0,01	0,01	0,05	0,00	0,01	0,01	0,001	0,00	0,00	0,01	308
CSN LB DL 65	2,00	0,04	0,29	0,01	0,02	0,01	0,05	0,00	0,01	0,01	0,001	0,00	0,00	0,01	290
CSN LB DL 65	2,00	0,03	0,28	0,01	0,02	0,01	0,05	0,00	0,01	0,01	0,001	0,00	0,00	0,01	284
CSN LB DL 65	2,00	0,04	0,28	0,01	0,01	0,01	0,05	0,00	0,01	0,01	0,001	0,00	0,00	0,01	290
CSN LB DL 65	2,00	0,04	0,28	0,01	0,01	0,01	0,05	0,00	0,01	0,01	0,001	0,00	0,00	0,01	308
CSN LB DL 65	2,00	0,04	0,28	0,01	0,01	0,01	0,05	0,00	0,01	0,01	0,001	0,00	0,00	0,01	294
CSN LB DL 65	2,00	0,03	0,28	0,01	0,02	0,01	0,05	0,00	0,01	0,01	0,001	0,00	0,00	0,01	246
CSN LB DL 65	2,00	0,04	0,28	0,01	0,01	0,01	0,05	0,00	0,01	0,01	0,001	0,00	0,00	0,01	247
CSN LB DL 65	2,00	0,04	0,31	0,01	0,01	0,01	0,05	0,00	0,01	0,01	0,001	0,00	0,00	0,00	279
CSN LB DL 65	2,00	0,04	0,30	0,01	0,01	0,01	0,05	0,00	0,00	0,04	0,001	0,00	0,00	0,01	253
CSN LB DL 65	2,00	0,04	0,27	0,01	0,01	0,01	0,04	0,00	0,01	0,01	0,001	0,00	0,00	0,00	281
CSN LB DL 65	2,00	0,04	0,27	0,01	0,02	0,02	0,06	0,00	0,02	0,01	0,001	0,00	0,00	0,00	334
CSN LB DL 65	2,00	0,04	0,30	0,01	0,01	0,01	0,05	0,00	0,00	0,04	0,001	0,00	0,00	0,01	245
CSN LB DL 65	2,00	0,04	0,27	0,01	0,01	0,01	0,04	0,00	0,01	0,01	0,001	0,00	0,00	0,00	304
CSN LB DL 65	2,00	0,04	0,27	0,01	0,02	0,02	0,06	0,00	0,02	0,01	0,001	0,00	0,00	0,00	296
CSN LB DL 65	2,00	0,04	0,32	0,01	0,01	0,01	0,06	0,00	0,01	0,01	0,003	0,00	0,00	0,00	275

Figura 23 Exemplo dos dados fornecidos pela indústria.

Tabela 1 Valores referentes a espessura de 2,00 mm.

Espessura nominal (mm)	Limite Escoamento (MPa)	Limite Resistência (MPa)
2,00	240	330
2,00	236	342
2,00	280	350
2,00	307	348
2,00	308	376
2,00	290	343
2,00	284	357
2,00	290	359
2,00	308	376
2,00	294	363
2,00	246	337
2,00	247	349
2,00	279	344
2,00	253	341
2,00	281	359
2,00	334	386
2,00	245	343
2,00	304	366
2,00	296	358
2,00	275	356

Tabela 2 Valores referentes a espessura de 2,30 mm.

Espessura nominal (mm)	Limite Escoamento (MPa)	Limite Resistência (MPa)
2,30	266	357
2,30	276	363
2,30	258	352
2,30	264	350
2,30	250	330
2,30	247	342
2,30	278	366
2,30	246	333
2,30	298	372
2,30	262	345
2,30	261	360
2,30	263	345
2,30	250	340
2,30	259	353
2,30	280	359
2,30	274	358
2,30	254	347
2,30	254	339
2,30	225	344
2,30	249	336
2,30	269	346
2,30	278	366
2,30	252	334
2,30	268	350
2,30	256	339
2,30	257	355
2,30	240	339
2,30	265	359
2,30	278	358
2,30	248	340
2,30	266	350
2,30	278	374
2,30	249	351
2,30	258	351
2,30	251	349
2,30	278	362
2,30	279	357
2,30	271	351
2,30	285	372
2,30	251	344
2,30	310	372

2,30	262	349
2,30	253	357
2,30	286	374
2,30	250	355
2,30	273	356
2,30	249	343
2,30	269	348
2,30	252	339
2,30	268	353
2,30	279	368
2,30	267	364
2,30	273	358
2,30	270	348
2,30	290	364
2,30	274	359
2,30	266	345
2,30	254	334
2,30	287	368
2,30	268	339
2,30	264	353
2,30	270	352
2,30	300	360
2,30	280	359
2,30	280	354
2,30	253	351
2,30	281	359
2,30	274	360
2,30	267	357
2,30	260	342
2,30	252	357
2,30	284	375
2,30	281	352
2,30	278	366

Tabela 3 Valores referentes a espessura de 2,60 mm.

Espessura nominal (mm)	Limite Escoamento (MPa)	Limite Resistência (MPa)
2,60	240	331
2,60	273	362
2,60	259	352
2,60	304	368
2,60	302	353
2,60	260	351
2,60	302	353
2,60	311	362
2,60	257	345
2,60	303	364
2,60	247	336
2,60	251	339
2,60	239	358
2,60	258	345
2,60	246	332
2,60	276	350
2,60	257	339
2,60	285	363
2,60	288	342
2,60	251	358
2,60	278	362
2,60	305	367
2,60	279	362
2,60	290	373
2,60	260	355
2,60	290	380

Tabela 4 Valores referentes a espessura de 2,65 mm.

Espessura nominal (mm)	Limite Escoamento (MPa)	Limite Resistência (MPa)
2,65	243	334
2,65	248	341
2,65	229	330
2,65	248	330
2,65	235	325
2,65	225	329
2,65	233	321
2,65	257	342
2,65	240	331
2,65	245	334
2,65	259	341
2,65	242	332
2,65	245	340
2,65	266	340
2,65	260	340
2,65	253	347
2,65	302	369
2,65	333	368
2,65	272	354
2,65	268	354
2,65	264	353
2,65	285	357
2,65	290	370
2,65	286	376
2,65	262	359
2,65	273	361
2,65	303	369
2,65	250	331
2,65	260	348
2,65	262	349
2,65	300	375
2,65	304	369
2,65	256	349
2,65	268	336
2,65	266	352
2,65	259	349
2,65	263	351
2,65	267	348
2,65	253	347
2,65	298	356
2,65	272	356

2,65	267	349
2,65	303	357
2,65	286	367
2,65	272	356
2,65	354	392
2,65	267	362
2,65	261	348
2,65	270	348
2,65	250	336
2,65	260	342
2,65	262	354
2,65	275	362
2,65	307	351
2,65	284	373
2,65	305	359
2,65	252	343
2,65	312	372
2,65	264	351
2,65	252	337
2,65	272	347
2,65	250	350

Tabela 5 Valores referentes a espessura de 3,00 mm.

Espessura nominal (mm)	Limite escoamento (MPa)	Limite Resistência (MPa)
3,00	277	359
3,00	299	392
3,00	320	378
3,00	248	335
3,00	254	345
3,00	249	339
3,00	249	329
3,00	267	348
3,00	292	365
3,00	260	347
3,00	267	348
3,00	285	354
3,00	249	339
3,00	310	382
3,00	260	347
3,00	263	338
3,00	225	318
3,00	225	318
3,00	280	354
3,00	254	345
3,00	244	320
3,00	288	354
3,00	300	355
3,00	298	363
3,00	298	363
3,00	276	359
3,00	328	384
3,00	268	354
3,00	266	366

Tabela 6 Valores referentes a espessura de 3,20 mm.

Espessura nominal (mm)	Limite Escoamento (MPa)	Limite Resistência (MPa)
3,20	273	358
3,20	278	342
3,20	278	354
3,20	244	333
3,20	282	364
3,20	278	367
3,20	257	345
3,20	280	360
3,20	278	362
3,20	256	343
3,20	272	348
3,20	278	370
3,20	297	366
3,20	276	363
3,20	260	344
3,20	302	366
3,20	240	336
3,20	271	353
3,20	270	350
3,20	270	356
3,20	273	361
3,20	257	344
3,20	259	339
3,20	275	344
3,20	276	351
3,20	240	327
3,20	254	343
3,20	264	340
3,20	259	346
3,20	259	341
3,20	275	352
3,20	272	349
3,20	235	329
3,20	245	331
3,20	315	380
3,20	280	356
3,20	259	346
3,20	259	347
3,20	250	337
3,20	310	354
3,20	265	349

3,20	274	362
3,20	262	338
3,20	267	349
3,20	280	363
3,20	267	348
3,20	240	332
3,20	275	355
3,20	256	341
3,20	262	343
3,20	270	360
3,20	265	346
3,20	275	344
3,20	270	355
3,20	270	343
3,20	278	342
3,20	272	334
3,20	277	365
3,20	300	379
3,20	250	338
3,20	256	342
3,20	254	345
3,20	255	345
3,20	261	337
3,20	253	336
3,20	280	346
3,20	250	342
3,20	256	339
3,20	252	336
3,20	291	360
3,20	279	370
3,20	260	359
3,20	265	353
3,20	255	339
3,20	270	350
3,20	268	355
3,20	227	323
3,20	259	349
3,20	274	366
3,20	264	346
3,20	274	366
3,20	254	332
3,20	273	348
3,20	270	350
3,20	295	369
3,20	274	354

3,20	269	357
3,20	276	354
3,20	262	346
3,20	271	349
3,20	259	335
3,20	296	376
3,20	261	348
3,20	252	339
3,20	257	344
3,20	246	332
3,20	303	364
3,20	278	373
3,20	272	360
3,20	278	353
3,20	255	337
3,20	256	343
3,20	242	332
3,20	251	335
3,20	267	338
3,20	293	367
3,20	266	352
3,20	260	341
3,20	272	344
3,20	263	333
3,20	274	346
3,20	269	351
3,20	267	342
3,20	280	371
3,20	279	357
3,20	270	351
3,20	257	339
3,20	317	380
3,20	248	324
3,20	278	359
3,20	278	365
3,20	324	368
3,20	277	343
3,20	265	345
3,20	275	354
3,20	280	356
3,20	260	340
3,20	292	367
3,20	279	354
3,20	264	345
3,20	264	347

3,20	275	361
3,20	277	357
3,20	251	338
3,20	277	368
3,20	260	341
3,20	322	390
3,20	268	353
3,20	269	344
3,20	276	351
3,20	280	361
3,20	270	351
3,20	279	358
3,20	279	352
3,20	291	359
3,20	264	353
3,20	261	335
3,20	273	343
3,20	252	336
3,20	244	333
3,20	304	377
3,20	301	377
3,20	280	352
3,20	277	345
3,20	280	372
3,20	300	361
3,20	268	344
3,20	300	352
3,20	267	350
3,20	261	350
3,20	280	346
3,20	256	340
3,20	279	347
3,20	273	365
3,20	277	357

Tabela 7 Valores referentes a espessura de 6,30 mm.

Espessura nominal (mm)	Limite Escoamento (MPa)	Limite Resistência MPa)
6,30	264	370
6,30	278	347
6,30	265	377
6,30	276	340
6,30	302	355
6,30	280	350
6,30	255	361
6,30	266	374
6,30	266	374
6,30	266	374
6,30	266	374
6,30	264	370
6,30	255	361
6,30	330	362
6,30	299	350
6,30	274	350
6,30	341	370
6,30	277	336
6,30	338	356
6,30	338	356
6,30	345	358
6,30	345	358
6,30	352	382
6,30	345	362
6,30	277	336

Diante dos dados apresentados, vale lembrar que, os valores referentes à porcentagem de alongamento não foram analisados neste estudo, pois os ensaios foram realizados com corpos de prova paralelos, ou seja, sem a redução da largura na região central do corpo de prova, e este tipo de corpo de prova leva a uma variação muito grande no resultado de porcentagem de alongamento, pois não há garantia de que o rompimento do corpo de prova ocorra na região central ou que esse rompimento seja afastado das garras da máquina de tração.

4.2. Dados que foram submetidos a regressão linear múltipla.

A seguir serão elencados os dados que foram analisados para o desenvolvimento deste estudo, analisou-se um total de 401 ensaios de tração, que por sua vez estão divididos em função da espessura nominal das bobinas, assim como pode ser visto na Tabela 8.

Tabela 8 Indicação da quantidade de dados analisados.

Espessura nominal da bobina (mm)	Número de bobinas analisadas (Unidades)
2,00	20
2,30	74
2,60	26
2,65	62
3,00	29
3,20	165
6,30	25

Para a identificação de cada bobina, foi desenvolvido um código que indica respectivamente a espessura nominal da bobina juntamente com o número do ensaio realizado para aquela espessura, por exemplo, o código (2,00 – 05) trata-se da bobina de (2,00 mm) de espessura e do ensaio número (05), vale lembrar que para cada espessura diferente de bobina o número de ensaio será reiniciado, ou seja, não é sequencial.

Por fim, os dados de limite de escoamento fornecidos pela indústria foram inseridos no Excel e submetidos aos testes de regressão linear múltipla, como pode ser observado nas imagens a seguir.

Regressão

Entrada

Intervalo Y de entrada:

Intervalo X de entrada:

Rótulos Constante é zero

Nível de confiança %

Opções de saída

Intervalo de saída:

Nova planilha:

Nova pasta de trabalho

Resíduos

Resíduos Plotar resíduos

Resíduos padronizados Plotar ajuste de linha

Probabilidade normal

Plotagem de probabilidade normal

Figura 24 Demonstração da realização da regressão linear múltipla.

RESULTADOS DE RESÍDUOS		
Observação	Previsto(a) Limite Escoamento	Resíduos
1	265	-25
2	268,25	-32,25
3	279,5	0,5
4	268,25	38,75
5	289,4	18,6
6	265	25
7	268,25	15,75
8	289,4	0,6
9	289,4	18,6
10	289,4	4,6
11	268,25	-22,25
12	289,4	-42,4
13	279,5	-0,5
14	249	4
15	292,5	-11,5
16	315	19
17	249	-4
18	292,5	11,5
19	315	-19
20	275	0

Figura 25 Exemplo dos resultados obtidos após a realização da regressão linear múltipla.

4.3. Resultados após a realização da regressão linear múltipla.

Definiu-se as tabelas a seguir comparando-se o limite de escoamento fornecido pela indústria com o limite de escoamento obtido através da regressão linear múltipla, já os resíduos são justamente a diferença entre estes dois valores.

Vale lembrar que, serão considerados valores bem sucedidos aqueles que apresentarem diferença de até 20 MPa, que é uma variação comumente aceita pela indústria.

Na Figura 26 temos um exemplo dos dados de coeficientes usados para a previsão do limite de escoamento, dados similares a estes foram utilizados nas equações que antecedem as tabelas dos resultados.

	<i>Coeficientes</i>
Interseção	224,17
% Carbono	13443,28
% Manganês	56,76
% Silício	11661,15
% Fosforo	-23062,54
% Enxofre	-9399,15
% Alumínio	-2899,31
% Nióbio	3133,35
% Cobre	-8486,03
% Cromo	-5646,13
% Titânio	14286,46
% Boro	-374769,93
% Vanádio	143625,34
% Níquel	26834,55

Figura 26 Valores de coeficientes.

4.3.1 Resultados da bobina de 2,00 mm

Cálculo para a predição do limite de escoamento:

$$LE_{(2,00)} = 407,85 + 3175,86*(\%C) - 752,42*(\%Mn) + 483,14*(\%Si) - 3177,78*(\%P) + 513,92*(\%Al) + 286,99*(\%Cu) - 871,04*(\%Cr)$$

Tabela 9 Apresenta resultados referente às bobinas de espessura de 2,00 mm.

Identificação	Limite Escoamento (MPa)	Limite Escoamento Previsto (MPa)	Resíduos
2,00 - 01	240	265	-25
2,00 - 02	236	268	-32
2,00 - 03	280	280	0
2,00 - 04	307	268	39
2,00 - 05	308	289	19
2,00 - 06	290	265	25
2,00 - 07	284	268	16
2,00 - 08	290	289	1
2,00 - 09	308	289	19
2,00 - 10	294	289	5
2,00 - 11	246	268	-22
2,00 - 12	247	289	-42
2,00 - 13	279	280	-1
2,00 - 14	253	249	4
2,00 - 15	281	293	-12
2,00 - 16	334	315	19
2,00 - 17	245	249	-4
2,00 - 18	304	293	12
2,00 - 19	296	315	-19
2,00 - 20	275	275	0

Diante dos resultados apresentados na Tabela 9, notou-se que os valores de limite de escoamento previsto referente aos dados (2,00 – 01; ...02; ...04; ...06; ...11 e ...12) se comparados com limite escoamento real, mostraram-se fora do limite de tolerância praticado pela indústria, que gira em torno de 20 MPa de diferença, mesmo assim, o modelo ainda se mostra efetivo para a previsão do limite de escoamento, já que a maioria dos dados (14) se encontram dentro do limite aceitável pela indústria.

4.3.2 Resultados da bobina de 2,30 mm

Cálculo para a predição do limite de escoamento:

$$LE_{(2,30)} = 223,94 + 568,58*(\%C) + 80,94*(\%Mn) - 1174,60*(\%Si) + 644,01*(\%P) + 70,11*(\%S) - 106,12*(\%Al) + 603,03*(\%Nb) - 453,58*(\%Cu) - 436,72*(\%Cr) - 2375,65*(\%Ti) + 10689,40*(\%B) + 7435,91*(\%V) + 783,56*(\%Ni)$$

Tabela 10 Apresenta resultados referente às bobinas de espessura de 2,30 mm.

Identificação	Limite Escoamento (MPa)	Limite Escoamento Previsto (MPa)	Resíduos
2,30 - 01	266	260	6
2,30 - 02	276	268	8
2,30 - 03	258	268	-10
2,30 - 04	264	258	6
2,30 - 05	250	258	-8
2,30 - 06	247	265	-18
2,30 - 07	278	268	10
2,30 - 08	246	260	-14
2,30 - 09	298	260	38
2,30 - 10	262	260	2
2,30 - 11	261	260	1
2,30 - 12	263	266	-3
2,30 - 13	250	264	-14
2,30 - 14	259	260	-1
2,30 - 15	280	260	20
2,30 - 16	274	260	14
2,30 - 17	254	257	-3
2,30 - 18	254	258	-4
2,30 - 19	225	258	-33
2,30 - 20	249	268	-19
2,30 - 21	269	258	11
2,30 - 22	278	268	10
2,30 - 23	252	258	-6
2,30 - 24	268	260	8
2,30 - 25	256	265	-9
2,30 - 26	257	260	-3
2,30 - 27	240	258	-18
2,30 - 28	265	258	7
2,30 - 29	278	260	18

2,30 - 30	248	257	-9
2,30 - 31	266	266	0
2,30 - 32	278	268	10
2,30 - 33	249	260	-11
2,30 - 34	258	265	-7
2,30 - 35	251	240	11
2,30 - 36	278	271	7
2,30 - 37	279	265	14
2,30 - 38	271	271	0
2,30 - 39	285	278	7
2,30 - 40	251	268	-17
2,30 - 41	310	278	32
2,30 - 42	262	260	2
2,30 - 43	253	260	-7
2,30 - 44	286	271	15
2,30 - 45	250	256	-6
2,30 - 46	273	271	2
2,30 - 47	249	260	-11
2,30 - 48	269	266	3
2,30 - 49	252	271	-19
2,30 - 50	268	271	-3
2,30 - 51	279	271	8
2,30 - 52	267	271	-4
2,30 - 53	273	260	13
2,30 - 54	270	268	2
2,30 - 55	290	278	12
2,30 - 56	274	282	-8
2,30 - 57	266	263	3
2,30 - 58	254	278	-24
2,30 - 59	287	268	19
2,30 - 60	268	278	-10
2,30 - 61	264	268	-4
2,30 - 62	270	278	-8
2,30 - 63	300	281	19
2,30 - 64	280	278	2
2,30 - 65	280	282	-2
2,30 - 66	253	269	-16
2,30 - 67	281	282	-1
2,30 - 68	274	282	-8
2,30 - 69	267	263	4
2,30 - 70	260	268	-8
2,30 - 71	252	267	-15
2,30 - 72	284	278	6
2,30 - 73	281	281	0
2,30 - 74	278	267	11

A Tabela 10 que nos traz dados de bobinas de 2,30 mm de espessura apresentou excelentes resultados do limite de escoamento previsto, tendo em vista que apenas às bobinas de (2,30 – 09; ...19; ...41 e ...58) ficaram fora do limite praticado pela indústria, como já mencionado algo em torno de 20 MPa, sendo assim, diante do montante de dados analisados (74) apenas (04) não foram representados adequadamente pelo modelo.

4.3.3 Resultados da bobina de 2,60 mm

Cálculo para a predição do limite de escoamento:

$$LE_{(2,60)} = -218,05 - 2269,20*(\%C) + 2233,91*(\%Mn) - 645,74*(\%Si) + 736,23*(\%P) - 7662,76*(\%S) + 881,97*(\%Al) + 18226,83*(\%Nb) - 4645,66*(\%Cu) + 2489,52*(\%Cr) - 17766,04*(\%Ti) - 431,96*(\%Ni)$$

Tabela 11 Apresenta resultados referente às bobinas de espessura de 2,60 mm.

Identificação	Limite Escoamento (MPa)	Limite Escoamento Previsto (MPa)	Resíduos
2,60 - 01	240	249	-9
2,60 - 02	273	266	7
2,60 - 03	259	266	-7
2,60 - 04	304	303	1
2,60 - 05	302	303	-1
2,60 - 06	260	286	-25
2,60 - 07	302	303	0
2,60 - 08	311	286	26
2,60 - 09	257	249	9
2,60 - 10	303	303	1
2,60 - 11	247	249	-2
2,60 - 12	251	249	2
2,60 - 13	239	259	-19
2,60 - 14	258	282	-23
2,60 - 15	246	267	-21
2,60 - 16	276	267	9
2,60 - 17	257	267	-10
2,60 - 18	285	268	17
2,60 - 19	288	267	21
2,60 - 20	251	268	-17

2,60 - 21	278	259	20
2,60 - 22	305	282	24
2,60 - 23	279	270	10
2,60 - 24	290	290	0
2,60 - 25	260	270	-9
2,60 - 26	290	290	0

Como pode ser observado na Tabela 11, os valores de limite de escoamento previsto mostraram-se satisfatórios diante dos valores adotados pela indústria, como já mencionado anteriormente, diante disso, apenas (06) dados analisados não foram representados de maneira adequada, são eles (2,60 – 06; ...08; ...14; ...15; ...19 e ...22) os outros (20) dados podem ser representados pelo modelo para a predição do limite de escoamento.

4.3.4 Resultados da bobina de 2,65 mm

Cálculo para a predição do limite de escoamento:

$$LE_{(2,65)} = 413,97 - 2382,62*(\%C) - 506,12*(\%Mn) + 1268,03*(\%Si) + 2991,19*(\%P) - 465,48*(\%S) + 1237,658(\%Al) + 5703,21*(\%Nb) - 854,46*(\%Cu) + 5023,26*(\%Cr) - 10048,25*(\%Ti) + 55546,74*(\%B) - 22309,35*(\%V) - 12506,67*(\%Ni)$$

Tabela 12 Apresenta resultados referente às bobinas de espessura de 2,65 mm.

Identificação	Limite Escoamento (MPa)	Limite Escoamento Previsto (MPa)	Resíduos
2,65 - 01	243	251	-8
2,65 - 02	248	251	-3
2,65 - 03	229	248	-19
2,65 - 04	248	245	3
2,65 - 05	235	240	-5
2,65 - 06	225	240	-15
2,65 - 07	233	240	-7
2,65 - 08	257	245	12
2,65 - 09	240	245	-5
2,65 - 10	245	248	-3
2,65 - 11	259	248	11
2,65 - 12	242	240	2
2,65 - 13	245	245	0
2,65 - 14	266	248	18
2,65 - 15	260	278	-18
2,65 - 16	253	263	-10
2,65 - 17	302	280	22
2,65 - 18	333	299	34
2,65 - 19	272	269	3
2,65 - 20	268	269	-1
2,65 - 21	264	269	-5
2,65 - 22	285	284	1
2,65 - 23	290	263	27
2,65 - 24	286	270	16
2,65 - 25	262	266	-4
2,65 - 26	273	270	3
2,65 - 27	303	270	33
2,65 - 28	250	278	-28
2,65 - 29	260	268	-8
2,65 - 30	262	269	-7
2,65 - 31	300	288	12

2,65 - 32	304	309	-5
2,65 - 33	256	263	-7
2,65 - 34	268	267	1
2,65 - 35	266	269	-3
2,65 - 36	259	268	-9
2,65 - 37	263	270	-7
2,65 - 38	267	269	-2
2,65 - 39	253	263	-10
2,65 - 40	298	309	-11
2,65 - 41	272	288	-16
2,65 - 42	267	263	4
2,65 - 43	303	267	36
2,65 - 44	286	289	-3
2,65 - 45	272	288	-16
2,65 - 46	354	299	55
2,65 - 47	267	265	2
2,65 - 48	261	299	-38
2,65 - 49	270	264	6
2,65 - 50	250	265	-15
2,65 - 51	260	276	-16
2,65 - 52	262	266	-4
2,65 - 53	275	284	-9
2,65 - 54	307	266	41
2,65 - 55	284	284	0
2,65 - 56	305	299	6
2,65 - 57	252	260	-8
2,65 - 58	312	284	28
2,65 - 59	264	299	-35
2,65 - 60	252	265	-13
2,65 - 61	272	260	12
2,65 - 62	250	265	-15

Os valores apresentados na Tabela 12, na sua maioria (51) conseguiram ser representados adequadamente pelo modelo aqui aplicado, podendo assim ser usado deste modelo para a predição do limite de escoamento, Já os dados (2,65 – 17; ...18; ...23; ...27; ...28; ..43; ...46; ...48; ...54; ...58 e ...59) no total de (11) não podem ser representados por esse modelo, o que pode explicar esse comportamento é, aceitar que existem variações de composição química na fabricação das bobinas e outros fatores, como por exemplo em qual parte da bobina foi submetida ao teste de tração para obtenção do limite de escoamento, além de ocorrerem erros experimentais que influenciam no limite de escoamento final.

4.3.5 Resultados da bobina de 3,00 mm

Cálculo para a predição do limite de escoamento:

$$LE_{(3,00)} = 224,17 + 13443,28*(\%C) + 56,76*(\%Mn) + 11661,15*(\%Si) - 23062,54*(\%P) - 9399,15*(\%S) - 2899,31*(\%Al) + 3133,35*(\%Nb) - 8486,03*(\%Cu) - 5646,13*(\%Cr) + 14286,46*(\%Ti) - 374769,93*(\%B) + 143625,34*(\%V) + 26834,55*(\%Ni)$$

Tabela 13 Apresenta resultados referente às bobinas de espessura de 3,00 mm.

Identificação	Limite Escoamento (MPa)	Limite Escoamento Previsto (MPa)	Resíduos
3,00 - 01	277	277	0
3,00 - 02	299	300	-1
3,00 - 03	320	312	8
3,00 - 04	248	248	0
3,00 - 05	254	263	-9
3,00 - 06	249	263	-14
3,00 - 07	249	246	3
3,00 - 08	267	263	4
3,00 - 09	292	299	-7
3,00 - 10	260	259	1
3,00 - 11	267	263	4
3,00 - 12	285	263	22
3,00 - 13	249	263	-14
3,00 - 14	310	312	-2
3,00 - 15	260	259	1
3,00 - 16	263	262	1
3,00 - 17	225	224	1
3,00 - 18	225	224	1
3,00 - 19	280	263	17
3,00 - 20	254	263	-9
3,00 - 21	244	246	-2
3,00 - 22	288	277	11
3,00 - 23	300	289	11
3,00 - 24	298	299	-1
3,00 - 25	298	299	-1
3,00 - 26	276	289	-13
3,00 - 27	328	327	1
3,00 - 28	268	277	-9
3,00 - 29	266	267	-1

Os valores da Tabela 13 nos apresenta um total de (29) dados, os mesmos apresentaram excelentes resultados de limite de escoamento previsto se comparado com o limite de escoamento real, dito isso, observa-se que apenas o valor de (3,00 – 12) se mostrou fora da tolerância, todos os outros de dados (28) podem ser representados pelo modelo de regressão linear múltipla já que nenhum fica fora do limite estabelecido pela indústria.

4.3.6 Resultados da bobina de 3,20 mm

Cálculo para a predição do limite de escoamento:

$$LE_{(3,20)} = 196,85 + 508,18*(\%C) + 164,80*(\%Mn) - 428,37*(\%Si) + 612,23*(\%P) + 321,44*(\%S) - 123,66*(\%Al) + 1525,95*(\%Nb) + 249,03*(\%Cu) - 202,69*(\%Cr) - 805,42*(\%Ti) - 1915,15*(\%B) - 14,53*(\%V) + 359,57*(\%Ni)$$

Tabela 14 Apresenta resultados referente às bobinas de espessura de 3,20 mm.

Identificação	Limite Escoamento (MPa)	Limite Escoamento Previsto (MPa)	Resíduos
3,20 - 01	273	264	9
3,20 - 02	278	266	12
3,20 - 03	278	266	12
3,20 - 04	244	268	-24
3,20 - 05	282	273	9
3,20 - 06	278	273	5
3,20 - 07	257	266	-9
3,20 - 08	280	266	14
3,20 - 09	278	273	5
3,20 - 10	256	266	-10
3,20 - 11	272	268	4
3,20 - 12	278	271	7
3,20 - 13	297	266	31
3,20 - 14	276	270	6
3,20 - 15	260	270	-10
3,20 - 16	302	271	31
3,20 - 17	240	272	-32
3,20 - 18	271	272	-1
3,20 - 19	270	266	4
3,20 - 20	270	266	4
3,20 - 21	273	271	2

3,20 - 22	257	268	-11
3,20 - 23	259	269	-10
3,20 - 24	275	266	9
3,20 - 25	276	274	2
3,20 - 26	240	264	-24
3,20 - 27	254	268	-14
3,20 - 28	264	269	-5
3,20 - 29	259	269	-10
3,20 - 30	259	268	-9
3,20 - 31	275	272	3
3,20 - 32	272	273	-1
3,20 - 33	235	263	-28
3,20 - 34	245	266	-21
3,20 - 35	315	271	44
3,20 - 36	280	270	10
3,20 - 37	259	270	-11
3,20 - 38	259	272	-13
3,20 - 39	250	273	-23
3,20 - 40	310	264	46
3,20 - 41	265	268	-3
3,20 - 42	274	269	5
3,20 - 43	262	266	-4
3,20 - 44	267	273	-6
3,20 - 45	280	270	10
3,20 - 46	267	272	-5
3,20 - 47	240	266	-26
3,20 - 48	275	266	9
3,20 - 49	256	266	-10
3,20 - 50	262	272	-10
3,20 - 51	270	273	-3
3,20 - 52	265	268	-3
3,20 - 53	275	263	12
3,20 - 54	270	273	-3
3,20 - 55	270	269	1
3,20 - 56	278	264	14
3,20 - 57	272	264	8
3,20 - 58	277	273	4
3,20 - 59	300	273	27
3,20 - 60	250	266	-16
3,20 - 61	256	266	-10
3,20 - 62	254	274	-20
3,20 - 63	255	268	-13
3,20 - 64	261	268	-7
3,20 - 65	253	264	-11
3,20 - 66	280	268	12

3,20 - 67	250	267	-17
3,20 - 68	256	266	-10
3,20 - 69	252	269	-17
3,20 - 70	291	270	21
3,20 - 71	279	271	8
3,20 - 72	260	273	-13
3,20 - 73	265	273	-8
3,20 - 74	255	269	-14
3,20 - 75	270	269	1
3,20 - 76	268	271	-3
3,20 - 77	227	261	-34
3,20 - 78	259	257	2
3,20 - 79	274	266	8
3,20 - 80	264	263	1
3,20 - 81	274	268	6
3,20 - 82	254	261	-7
3,20 - 83	273	258	15
3,20 - 84	270	272	-2
3,20 - 85	295	275	20
3,20 - 86	274	268	6
3,20 - 87	269	266	3
3,20 - 88	276	266	10
3,20 - 89	262	266	-4
3,20 - 90	271	275	-4
3,20 - 91	259	261	-2
3,20 - 92	296	262	34
3,20 - 93	261	269	-8
3,20 - 94	252	260	-8
3,20 - 95	257	283	-26
3,20 - 96	246	269	-23
3,20 - 97	303	268	35
3,20 - 98	278	268	10
3,20 - 99	272	268	4
3,20 - 100	278	268	10
3,20 - 101	255	272	-17
3,20 - 102	256	266	-10
3,20 - 103	242	257	-15
3,20 - 104	251	258	-7
3,20 - 105	267	267	0
3,20 - 106	293	283	10
3,20 - 107	266	267	-1
3,20 - 108	260	259	1
3,20 - 109	272	272	0
3,20 - 110	263	262	1
3,20 - 111	274	262	12

3,20 - 112	269	268	1
3,20 - 113	267	266	1
3,20 - 114	280	268	12
3,20 - 115	279	268	11
3,20 - 116	270	268	2
3,20 - 117	257	272	-15
3,20 - 118	317	267	50
3,20 - 119	248	261	-13
3,20 - 120	278	274	4
3,20 - 121	278	291	-13
3,20 - 122	324	275	49
3,20 - 123	277	275	2
3,20 - 124	265	277	-12
3,20 - 125	275	268	7
3,20 - 126	280	272	8
3,20 - 127	260	266	-6
3,20 - 128	292	277	15
3,20 - 129	279	275	4
3,20 - 130	264	268	-4
3,20 - 131	264	271	-7
3,20 - 132	275	291	-16
3,20 - 133	277	268	9
3,20 - 134	251	274	-23
3,20 - 135	277	281	-4
3,20 - 136	260	277	-17
3,20 - 137	322	291	31
3,20 - 138	268	271	-3
3,20 - 139	269	268	1
3,20 - 140	276	266	10
3,20 - 141	280	291	-11
3,20 - 142	270	275	-5
3,20 - 143	279	275	4
3,20 - 144	279	269	10
3,20 - 145	291	275	16
3,20 - 146	264	271	-7
3,20 - 147	261	274	-13
3,20 - 148	273	275	-2
3,20 - 149	252	274	-22
3,20 - 150	244	272	-28
3,20 - 151	304	291	13
3,20 - 152	301	291	10
3,20 - 153	280	275	5
3,20 - 154	277	272	5
3,20 - 155	280	289	-9
3,20 - 156	300	274	26

3,20 - 157	268	272	-4
3,20 - 158	300	275	25
3,20 - 159	267	274	-7
3,20 - 160	261	275	-14
3,20 - 161	280	275	5
3,20 - 162	256	272	-16
3,20 - 163	279	275	4
3,20 - 164	273	271	2
3,20 - 165	277	277	0

Os dados apresentados na Tabela 14 se comparado com outras tabelas já aqui citadas, são os quais tem-se a maior quantidade de bobinas um total de (165), sendo assim, como já era esperado devido ao grande número de dados, ocorreram que algumas bobinas não conseguiram ser representadas pelo modelo, são elas (3,20 – 04; ...13; ...16; ...17; ...26; ...33; ...34; ...35; ...39; ...40; ...47; ...59; ...70; ...77; ...92; ...95; ...96; ...97; ...118; ...122; ...134; ...137; ...149; ...150; ...156; e ...158) num total de (26) bobinas.

Apesar de algumas bobinas não serem representados pelo modelo adotado, ainda sim os valores de limite de escoamento previsto são bastante satisfatórios quando é levado em conta o número de bobinas avaliadas, vários fatores podem influenciar os valores de limite de escoamento fornecido pela indústria, desde variação de composição química até mesmo o método utilizado pelo técnico para a determinação do limite de escoamento.

4.3.7 Resultados da bobina de 6,30 mm

Cálculo para a predição do limite de escoamento:

$$LE_{(6,30)} = 2026,35 + 26639,73*(\%C) - 2951,32*(\%Mn) - 41220,52*(\%Si) - 36728,97*(\%P) - 10410,12*(\%S) - 14077,66*(\%Al) + 8178,45*(\%Nb) + 134,53*(\%Cu) - 2151,40*(\%Cr) - 92570,84*(\%Ti) - 15670,73*(\%Ni)$$

Tabela 15 Apresenta resultados referente às bobinas de espessura de 6,30 mm.

Identificação	Limite Escoamento (MPa)	Limite Escoamento Previsto (MPa)	Resíduos
6,30 - 01	264	264	0
6,30 - 02	278	277	1
6,30 - 03	265	265	0
6,30 - 04	276	277	-1
6,30 - 05	302	302	0
6,30 - 06	280	280	0
6,30 - 07	255	255	0
6,30 - 08	266	266	0
6,30 - 09	266	266	0
6,30 - 10	266	266	0
6,30 - 11	266	266	0
6,30 - 12	264	264	0
6,30 - 13	255	255	0
6,30 - 14	330	314	16
6,30 - 15	299	314	-15
6,30 - 16	274	308	-33
6,30 - 17	341	308	34
6,30 - 18	277	277	0
6,30 - 19	338	342	-3
6,30 - 20	338	342	-3
6,30 - 21	345	342	4
6,30 - 22	345	342	4
6,30 - 23	352	349	4
6,30 - 24	345	349	-3
6,30 - 25	277	277	0

Na Tabela 15 temos valores referentes às bobinas de 6,30 mm de espessura num total de (25) bobinas, que apresentaram excelentes resultados de limite de escoamento previsto, apenas (02) bobinas não se enquadraram no modelo de regressão linear múltipla, são elas (6,30 – 16 e 6,30 – 17). Diante dos valores apresentados pode-se dizer que o modelo é sim efetivo se aplicado para a predição do limite de escoamento, tendo em vista a baixa variação nos valores de resíduos sendo em sua maioria zero, ou seja, o limite de escoamento previsto é igual ao limite de escoamento real.

Na Tabela 16 temos um resumo dos principais resultados apresentados até aqui.

Tabela 16 Resumo dos resultados obtidos.

Espessura (mm)	Nº de ensaios realizados	Nº de resultados satisfatórios	% sucesso na previsão do LE
2,00	20	14	70
2,30	74	70	95
2,60	26	20	77
2,65	62	51	82
3,00	29	28	97
3,20	165	139	84
6,30	25	23	92

5. CONCLUSÃO

Diante do presente estudo, foi possível através do método de regressão linear múltipla desenvolver um modelo que possibilita prever o limite de escoamento de aços laminados a quente.

Dito isso, após a realização dos testes identificou-se resultados bastante promissores tendo em vista parâmetros adotados pela indústria, aqui neste trabalho foi considerado um desvio máximo 20 MPa para o limite de escoamento previsto, foi também estipulado um número mínimo de 20 bobinas submetidas aos testes e não fixou-se um número máximo de bobinas a serem testadas, essa metodologia teve como objetivo minimizar erros que podem ser provocados por um baixo número de amostras, que nos levaria a resultados equivocados.

Sendo assim, pode-se observar alguns resultados bastante expressivos em relação a metodologia aplicada, na Tabela 13 referente às bobinas de 3,00 mm de espessura com um total de 29 bobinas, houve apenas um desvio significativo do limite de escoamento previsto em relação ao limite de escoamento real. Outro resultado bastante elucidativo são os valores da Tabela 14 que tratam das bobinas de 3,20 mm de espessura e 165 bobinas, neste caso em específico 26 bobinas não foram representadas adequadamente pelo modelo, ou seja, o limite de escoamento previsto ficou fora do desvio estabelecido.

Procedimentos executados no processo de laminação podem explicar o motivo pelo qual algumas bobinas não foram adequadamente representadas pelo modelo, são exemplos os parâmetros de processo de laminação como a temperatura de acabamento de laminação e a temperatura de bobinamento do material. Vale lembrar que o tamanho de grão é um parâmetro importante na definição das propriedades mecânicas, mas esses dados de tamanho de grão não tivemos acesso e não foi considerado no presente trabalho.

A falta dos dados de tamanho de grão pode resultar na variação dos resultados, mas o objetivo do trabalho é propor uma metodologia de previsão do limite de escoamento através dos únicos dados disponíveis que a indústria tem acesso através do certificado de qualidade.

Por fim, o modelo aqui aplicado pode sim ser utilizado para prever o limite de escoamento de bobinas laminadas a quente, sabendo que, futuramente a uma metodologia similar poderá ser aplicada a outros materiais metálicos com o intuito de prever outras propriedades.

6. REFERÊNCIAS

1. Chiaverini, V. **Tecnologia mecânica**. Volume 1. São Paulo: McGraw-Hill; 1986. 10–63 p.
2. Callister Jr, W.D.; Rethwisch D.G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9th ed. Rio de Janeiro: LTC; 2018. 157–409 p.
3. Bresciani Filho, E.; Silva I.B da; Batalha G.F; Button S.T. **Conformação plástica dos metais**. 6th ed. Campinas; 2011. 12–31 p.
4. Modenesi, P.J. **Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis**. Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. 2012;1:100. Disponível em <<https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metferritic1.pdf>> Acesso em : 08 de junho de 2021
5. Pannoni, F.D. **Aços estruturais**. 22(2002). Disponível em: <<https://docplayer.com.br/17146411-Acos-estruturais-fabio-domingos-pannoni-m-sc-ph-d-1.html>> Acesso em: 08 de abril de 2021
6. Souza, S.A de. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. 5th ed. São Paulo: Blucher; 1982. 7–13 p.
7. Prates, M.B. **Influência do resfriamento na laminação termomecânica de um aço microligado ao nióbio em fio máquina para a fabricação de parafusos da classe 8.8**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. 2011;46. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/39091>> Acesso em: 06 de abril de 2021.
8. GORNI, A.A. **Estudo Traça Relações Entre Microestrutura E Propriedades Mecânicas Em Aços Estruturais**. 5º Congresso de Corte e Conformação de Metais, Aranda Eventos. 2009;(5):100–10. Disponível em: <http://www.gorni.eng.br/Gorni_CongCCM_MecEnd_Out2009.pdf> Acesso em: 08 de junho de 2021.
9. Montgomery, D.C.; Runger, G.C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 4th ed. Rio de Janeiro: LTC; 2009. 265–283 p.
10. Rodrigues, S.C.A. **Modelo de Regressão Linear e suas Aplicações**. Universidade da Beira Interior. 2012;(3):94. Disponível em:<<https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/1869/1/Tese%20Sandra%20Rodrigues.pdf>> Acessado em: 05 de abril de 2021.

11. Lapponi, J.C. **Estatística usando excel**. 4th ed. Rio de Janeiro: CAMPUS-RJ; 2005.