

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

**DESENVOLVIMENTO DE MODELOS TEÓRICOS PARA DUREZA BRINELL,
UTILIZANDO MÉTODO DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA E FÓRMULAS
DE CARBONO EQUIVALENTE PARA AÇO SAE 52100**

Carolina Boufleur Buboltz

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Wagner Viana Bielefeldt
Co-Orientadores: Professor Dr. Afonso Reguly
Renata Helena Santer Becker

Porto Alegre
2016

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre estiveram me incentivando ao estudo e me proporcionando o melhor para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

“Só fazemos melhor aquilo que repetidamente insistimos em melhorar. A busca da excelência não deve ser objetivo, mas um hábito”.

(Aristóteles)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Milton Martin Buboltz e Maria Helena Boufleur Buboltz, que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando nas horas boas e ruins, me incentivando ao estudo, me proporcionando o melhor que podiam me oferecer para meu bem-estar e desenvolvimento pessoal e profissional, juntamente com todo o amor transmitido das mais diversas formas.

Ao meu irmão, Henrique Boufleur Buboltz, por me ouvir e me apoiar sempre que precisei.

Ao meu namorado, Fernando Braga Freda, que conviveu (e convive) comigo durante os últimos 4 anos de faculdade, sempre me incentivando ao curso de Engenharia, com seu amor, carinho e companheirismo.

Aos meus orientadores, Professor Dr. Wagner Viana Bielefeldt e Professor Dr. Afonso Reguly, que me deram suporte do início ao fim deste Trabalho de Diplomação

A minha co-orientadora, da empresa Gerdau Aços Especiais Charqueadas, Mestra e Engenheira Renata Helena Santer Becker, por me ajudar sempre que necessitei, esclarecendo todas as dúvidas sempre com paciência. Por seu ótimo conhecimento técnico do fluxo de produção, das características dos produtos produzidos e dos sistemas internos da empresa.

A equipe dos laboratórios Químico e Metalúrgico, que sempre estiveram disponíveis para me ajudar, contribuindo para o andamento deste estudo. Em especial ao Rafael Silva de Antoni, por sua disposição em ensinar, confiar no meu trabalho e me apoiar sempre que necessário. Ao José Luis Pedreira da Cunha, ao Vitor Hugo Nogueira da Silva e ao Rafael Zimmermann Stefani. Ao Jader Daniel Brito, pelo seu conhecimento técnico e disposição em ajudar, contribuindo para a idéia inicial do estudo.

A equipe de Pesquisa e Desenvolvimento da Usina que contribuiu com todo o conhecimento técnico, em especial a Ayumi Yoshioka e ao Gabriel Filipe Barreiras Marques Gamito Cardoso.

Ao Wellington Jose Carvalho da Conceição, por todo seu conhecimento técnico em estatística e no software Minitab. Por sua disposição e paciência em repassar o conhecimento.

A minha amiga, Mestra Engenheira Sara Matte Manhobosco, com todo seu carinho, amizade, apoio e conhecimento metalúrgico durante todo período de faculdade. Ao Mestre Engenheiro João Carlos Brancher, por seu conhecimento metalúrgico e do software Minitab e disponibilidade em ajudar.

A UFRGS e seus professores, que me proporcionaram um ensino com qualidade diferenciada. Aos meus colegas de faculdade que contribuíram para minha formação.

As minhas amigas de Santa Cruz do Sul de longa data, que sempre estão ao meu lado e me apoiam. Em especial, Vanessa Heinen e a Engenheira Ana Luiza Helfer. A todos meus amigos e familiares, em especial, aos meus primos, Mestre e Engenheiro Felipe Buboltz Ferreira, e ao Daniel Boufleur Dreher, que contribuíram de alguma forma para minha formação em Engenharia Metalúrgica.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	III
SUMÁRIO.....	V
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	XII
RESUMO	XIV
ABSTRACT	XV
1.0 INTRODUÇÃO	1
2.0 REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 Pocesso de fabricação do aço.....	3
2.1.1 Aciaria	4
2.1.2 Laminação	7
2.2 Efeito dos Elementos de Liga	9
2.2.1 Efeito dos elementos de liga na estabilização da austenita e da ferrita	11
2.2.2 Efeito dos elementos de liga na formação da perlita.....	15
2.2.3 Efeito dos elementos de liga nos carbonetos	19
2.2.4 Efeito dos elementos de liga na têmpera	22
2.2.5 Efeito dos elementos de liga: particularidades de cada elemento	23
2.2.6 Efeito dos elementos de liga na microestrutura.....	25
2.3 Microestrutura e Tratamento Térmico.....	26
2.3.1 Perlita e cementita	28
2.3.2 Curva CCT do aço SAE 52100	29
2.4 O aço SAE 52100	31
2.5 Carbono Equivalente.....	34
2.5.1 Fórmulas existentes e seus empregos	34
3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	47
3.1 Metodologia	47

3.1.1	Obtenção dos dados de produção de 2015	49
3.1.2	Direcionamento do trabalho e estimativa de ganho em tempo por ensaio	50
3.1.3	Obtenção dos dados históricos de dureza Brinell e de composição química referente ao período de 2012 a 2015	55
3.1.4	Confiabilidade dos resultados gerados pelo durômetro.....	56
3.1.5	Obtenção de fórmulas carbono equivalente mais adequadas	58
3.1.6	Obtenção dos modelos teóricos (7 equações de dureza brinell).....	59
3.1.7	Obtenção dos dados de dureza Brinell e de composição química referente ao período de janeiro a setembro de 2016.....	67
3.1.8	Escolha do melhor modelo teórico para prever a dureza Brinell do aço SAE 52100	71
3.2	Materiais utilizados.....	71
3.2.1	Aço SAE 52100.....	71
3.2.2	Equipamentos utilizados para gerar resultados de composição química e dureza brinell.....	72
3.2.3	Softwares utilizados.....	75
3.3	Amostragem.....	76
3.4	O Ensaio de dureza Brinell	76
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
4.1	Estabilidade dos resultados históricos de dureza Brinell.....	81
4.2	Confiabilidade dos dados de dureza Brinell	82
4.3	Metalografia representativa das amostras do aço SAE52100 sem tratamento térmico	82
4.4	Modelos teóricos obtidos	84
4.4.1	Influência da bitola nos valores de dureza.....	84
4.4.2	Modelos obtidos e suas validações.....	86
5.0	CONCLUSÕES.....	91
6.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	93
7.0	REFERÊNCIAS	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Principais etapas do processo siderúrgico: Redução, Refino e Conformação Mecânica.....	3
Figura 2.2	Fluxograma da aciaria com suas etapas.....	4
Figura 2.3	Fluxograma básico do processo de laminação geral.	7
Figura 2.4	Fluxograma básico de inspeção de barras laminadas.	8
Figura 2.5	Os dois grupos, A e B, e as subdivisões, I e II dos diagramas de equilíbrio de fases para liga de ferro.	11
Figura 2.6	Diagrama de equilíbrio Ferro-Manganês.....	12
Figura 2.7	Diagrama de equilíbrio Ferro-Cromo.	13
Figura 2.8	Diagrama de equilíbrio Ferro-Nióbio.	14
Figura 2.9	Tendência relativa dos elementos de liga, em termos de entalpia, para a formação da ferrita e da austenita.	15
Figura 2.10	Início da formação da perlita (1%) em aço com 0,03% de Nióbio e sem Nióbio após austenitização a 900 °C e 1350 °C em aço com 0,8% de Carbono. Tamanho de grão = 1 mm.	16
Figura 2.11	Curva de temperabilidade (não padronizada) dos aços 0,85% C com e sem adição de 0,03% Nb, austenitizada a 1350 °C.....	17
Figura 2.12	Efeito dos elementos de liga no aumento da temperabilidade dos aços.	17
Figura 2.13	Influência dos elementos de liga na temperatura e composição eutetóide do diagrama Fe-C.....	18
Figura 2.14	Correlação entre a resistência mecânica de aços 0,2; 0,4; 0,8% C, com ou sem adição de Nióbio, e a dureza Brinell após laminação em diferentes temperaturas e resfriamento ao ar.	20
Figura 2.15	Propriedades mecânicas e tamanho de grão austenítico de aços 0,8% C, com ou sem adição de 0,026% Nb, após a laminação em diferentes temperaturas seguida de resfriamento ao ar. Redução total de 34% aplicada em dois passes.	22

Figura 2.16	Representação esquemática da transformação da austenita em cementita pró-eutetóide e perlita (P) em aço de composição hipereutetóide em condições próximas ao equilíbrio.	26
Figura 2.17	Variação da dureza da perlita com o espaçamento interlamelar para aços 0,85% C com e sem adição de 0,03% Nb.	28
Figura 2.18	Diagrama de Transformação Isotérmico. Composição química: 1,02 C, 0,36 Mn, 0,20 Ni e 1,41 Cr, austenitizado a 845 °C. Tamanho de grão 9.	30
Figura 2.19	Curva de Resfriamento Contínuo. Composição química: 1,06 C, 0,33 Mn, 0,32 Si, 1,44 Cr. Austenitizado a 845 °C e com tamanho de grão 9. A_{C3} 780 °C, A_{C1} 755 °C. Onde "A" é austenita, "F" é ferrita, "P" é perlita, "B" é bainita e "M" é martensita.....	31
Figura 2.20	Exemplo de rolamento para aplicações de esferas laminadas: a superfície dos rolamentos deve ter maior resistência superficial ao desgaste.....	32
Figura 2.21	Variação da dureza da zona afetada pelo calor (a) com o teor de Carbono e (b) com o carbono equivalente em soldagem a laser com combinação tanto semelhante quanto diferentes: fórmulas de regressão obtidas utilizando ajuste linear de dados experimentais estão também inclusas.	41
Figura 3.1	Fluxograma (página seguinte) da metodologia seguida no estudo, com legenda que explica quais informações são etapas, quais representam a maneira que foram realizadas e quais foram os resultados obtidos.....	47
Figura 3.2	Diagrama de Pareto: quantidade de ordens de produção por tipo de produto produzido no período de 2015.	50
Figura 3.3	Diagrama de Pareto: quantidade de ordens de produção por tipo de acabamento no aço produzido no período de 2015.....	51
Figura 3.4	Diagrama de Pareto: quantidade de ordens de produção por tipo de ensaio realizado no período de 2015.....	52
Figura 3.5	Diagrama de Pareto: quantidade de ordens de produção por tipo de qualidade de aço produzida no período de 2015.	53
Figura 3.6	Parte ilustrativa das bitolas obtidas no período de 2012 a 2015, conforme dados de dureza Brinell e composição química, dipostas no software Excel.	54
Figura 3.7	Parte ilustrativa dos dados históricos de resultados de dureza Brinell, dipostos no software Excel.....	56
Figura 3.8	Representação de parte dos dados históricos de dureza Brinell e de composição química, juntamente com os cálculos dos fatores F_x , conforme a Equação 2.12, dipostos no Excel.....	60

Figura 3.9	Representação de parte dos dados históricos de dureza Brinell e de composição química, juntamente com os valores das bitolas e limites de especificação de dureza, dispostos no Minitab.	65
Figura 3.10	Representação da equação gerada por regressão linear múltipla, sem considerar a bitola como sendo uma das variáveis. Tabelas de valores de p e R ² são geradas, indicando valores de p de cada um dos elementos e 1 valor de R ² . Imagem retirada do Minitab.....	66
Figura 3.11	Representação dos dados de dureza Brinell e de composição química obtidos no sistema MES, referentes ao período de janeiro a setembro de 2016.	68
Figura 3.12	Parte ilustrativa das bitolas obtidas no período de 2016, conforme dados de dureza Brinell e composição química, dipostas no software Excel.	68
Figura 3.13	Ilustração de parte da tabela gerada no Excel dos 244 resultados obtidos de dureza Brinell a partir de cada um dos 7 modelos teórico, bem como os valores de dureza Brinell Prática obtidos em nos dados de 2016.	70
Figura 3.14	Amostras do aço SAE 52100 preparadas (lixadas, polidas e atacadas), prontas para análise.....	72
Figura 3.15	Microscópio óptico utilizado para observação da microestrutura de amostras de aço.	72
Figura 3.16	Espectrômetro de Emissão Ótica ARL 4460, utilizado para análise da composição química do aço SAE 52100.	73
Figura 3.17	Medidor simultâneo de Carbono e Enxofre LECO CS 230, utilizado para análise do teor de Carbono e Enxofre do aço SAE 52100.	74
Figura 3.18	Durômetro Wolpert Dia Testor 2N, utilizado no ensaio de dureza Brinell do aço SAE 52100.	74
Figura 3.19	Fluxograma do processo de produção da Gerdau Aços Especiais Piratini (Charqueadas).	76
Figura 3.20	Fluxograma das etapas de preparo dos corpos de prova e das etapas do ensaio de dureza Brinell.	78
Figura 3.21	Ensaio de dureza Brinell no Wolpert Dia Testor 2N, com esfera de 2,5 mm e carga de 187,5 kgf sendo impressa a ½ raio da amostra.....	79
Figura 3.22	Corpos de prova preparados para o ensaio de dureza Brinell, já realizada a impressão em alguns deles.....	79
Figura 3.23	Leitura das diagonais do ensaio de dureza Brinell no Wolpert Dia Testor 2N.	80

Figura 4.1	Gráfico dos 283 resultados históricos de dureza Brinell, obtidos no período de 2012 a 2015, plotados em azul e os limites de especificação aceitáveis, inferior (280 HB) e superior (390 HB), plotados em vermelho.....	82
Figura 4.2	Microestruturas do aço SAE 52100, constituídas por perlita e cementita nos contronos de grão, referentes às bitolas (A) 28,58 mm, (B) 36,51 mm e (C) 50,8 mm.	83
Figura 4.3	Representação da equação gerada por regressão linear múltipla, considerando a bitola como sendo uma das variáveis, juntamente com os elementos químicos. Valor de p da bitola igual a 0,717. Imagem retirada do Minitab.	85
Figura 4.4	Resultados da quantidade de diferenças menores que 7 HB (entre valores de dureza Brinell Prática e valores gerados via modelos.	87
Figura 4.5	Representação da repetitividade e erro da máquina de ensaio, para dureza Brinell.	88
Figura 4.6	Figura representativa retirada da tabela original, disposta no software Excel, ilustrando as colunas de cálculos de diferenças entre resultados via modelos e resultados de dureza Prática, bem como diferenças permitidas via Norma NBR ISO NM 6506-2:2010.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Principais características alteradas peloas elementos de liga.	10
Tabela 2.2	Efeito dos elementos de liga no espaçamento interlamelar da perlita.	19
Tabela 2.3	Efeitos específicos de alguns elementos de liga nos aços.	24
Tabela 2.4	Efeito do tamanho de grão austenítico sobre certas características dos aços.27	
Tabela 2.5	Efeito do tipo de estrutura sobre as propriedades de tração do aço.....	33
Tabela 2.6	Fórmulas de carbono equivalente, com valores dos elementos químicos representado em % em massa.	36
Tabela 2.7	Comparativo dos coeficientes de correlação R^2 para carbono equivalente e as propriedades do metal de solda.....	38
Tabela 2.8	Resumo das fórmulas de carbono equivalente, com valores dos elementos químicos em % em massa, utilizadas neste Trabalho de Diplomação, com a respectiva numeração do Modelo que irá representar.....	45
Tabela 3.1	Ensaio correspondente acada letra que o representa no eixo x do gráfico da Figura 3.4.	52
Tabela 3.2	Apresentação dos 7 Modelos teóricos desenvolvidos com seus respectivos cálculos. Continua nas 2 próximas páginas.	62
Tabela 3.3	Composição química nominal em % em massa do aço SAE 52100. Fonte: Adaptado de SAE J404.	71
Tabela 3.4	Tamanhos de seção para o corte dos corpos de prova para o ensaio de dureza Brinell.	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

C	Carbono
Mn	Manganês
Cr	Cromo
Fe	Ferro
Ni	Níquel
Si	Silício
Al	Alumínio
Mo	Molibdênio
W	Tungstênio
V	Vanádio
Nb	Nióbio
Ti	Titânio
N	Nitrogênio
Co	Cobalto
B	Boro
P	Fósfor
Cu	Cobre
Bi	Bismuto
S	Enxofre
CCT	Continuous Cooling Transformation
HV	Dureza em Vickers
Ceq	Carbono equivalente
AEP	Aços Especiais Piratini
R&R	Repetibilidade e Reprodutibilidade
HB _x	Dureza Brinell por método
CE _x	Carbono equivalente por método
F _x	Fator de dureza por método
ZAC	Zona afetada pelo calor
BLR IP	Barra laminada redonda inspecionada
BLR IT IP	Barra laminada redonda inspecionada Intermediária
BLR IT	Barra laminada redonda Intermediária
BLR	Barra laminada redonda
BLQ	Barra laminada quadrada
BFR	Barra forjada redonda
FMR	Fio máquina recozido
BLQ IP	Barra laminada quadrada inspecionada
BFC	Barra forjada chata
FMR IT	Fio máquina redondo intermediário
STT	Sem tratamento térmico
STM	Sem tratamento térmico (com manta)
BEM	Beneficiado
REC	Recozido

ESF	Esferoidizado
REL	Recozido de laminação
STA	Sem tratamento térmico
NOR	Normalizado
BEM	Beneficiado com manta
STR	Sem tratamento térmico (recozido de processo)
REF	Recozido
BEA	Beneficiado
NRV	Normalizado e revenido
RAT	Recozimento para alívio de tensões
NOL	Normalizado específico
REM	Recozido com manta
RSB	Recozido específico
REB	Recozido específico
ESM	Emirilhado
LRE	Laminado para trefila
LTR	Laminado para esferoidização
NOA	Normalizado
SOL	Solubilizado
NOM	Normalizado específico
BAT	Beneficiado com alívio de tensões

RESUMO

Muito se fala em produtividade nas empresas, visto que é necessário, cada vez mais, aumentar a produtividade para se manter competitivo. Uma das maneiras disso ser feito é reduzindo os tempos de processos, porém, deve se tomar cuidado ao realizar ações voltadas a isso, de modo a garantir sempre a qualidade do produto e a representatividade amostral, caso se aplique.

Sendo assim, este Trabalho de Diplomação foi desenvolvido no Laboratório Metalúrgico da Usina Gerdau Aços Especiais de Charqueadas e seu principal objetivo foi desenvolver modelos teóricos que prevejam valores de dureza Brinell, para a qualidade de aço SAE 52100, sem tratamento térmico. Foi realizado um estudo preliminar para verificar onde seria o maior ganho em termos de produtividade, direcionando, desta forma o produto e a qualidade de aço, bem como o ensaio a ser estudado. As equações dos modelos teóricos foram desenvolvidas a partir de duas maneiras: 6 equações a partir de equações de carbono equivalente conhecidas na literatura metalúrgica e 1 equação a partir de uma regressão linear múltipla, obtida através do software Minitab. Ambos métodos foram desenvolvidos com o uso de dados históricos de dureza Brinell e de respectiva composição química (conjunto de 283 dados), referentes ao período de 2012 a 2015. Isso por que foi observado que a microestrutura era estável na qualidade de aço estudada, portanto, a dureza variava apenas com a composição química da corrida do aço produzido. Foi realizada análise da confiabilidade dos dados gerados pelos equipamentos, além de uma análise da estabilidade dos resultados históricos de dureza Brinell, comparando-os com os limites de especificação.

Após a obtenção dos 7 modelos teóricos, foram obtidos mais 244 dados de dureza Brinell e respectiva composição química - referentes ao período de janeiro a setembro de 2016 – a fim de validar os modelos teóricos, isto é, comparar os 244 resultados gerados pelos modelos com os 244 resultados de dureza Brinell de 2016. Foi escolhido o melhor modelo.

Palavras-chave: dureza Brinell teórica, carbono equivalente, regressão linear múltipla.

ABSTRACT

Productivity is an important factor in industry, since it's necessary, each more, increasing the productivity to remain competitive. One of the ways it could be done is by reducing process time, however, it must be taken precautions in doing actions directed to this, in a way of guaranteeing always the quality of the product and the sample representativeness, in case if it is applicable.

Thus, this final paper was developed in the metallurgical laboratory of the Gerdau Specialty Steel Charqueadas and its main objective was to develop theoretical models that predict Brinell hardness values, for the SAE 52100, without thermal treatment. A preliminary study was carried out to verify where the main gain would be, in terms of productivity, directing, this way the product and the grade of steel, as well as the test to be studied. The equations of the theoretical model were done according to two ways: six equations from equivalent carbon equations known in the metallurgical literature and one equation from a multiple linear regression, obtained by Minitab software use. Both methods were developed with use of historical data of Brinell hardness and their respective chemical composition (set of 283 data), referred to the period of 2012 and 2015. This because it was observed the microstructure was stable in the studied steel grade, therefore, the hardness varied only with chemical composition of the produced steel heat. It was carried out an analysis of data reliability generated by the equipments, besides a stability analysis of historical results of Brinell hardness, comparing them with the specification limits.

After the obtainment of seven theoretic models, it were obtained 244 hardness Brinell data and the respective chemical composition – referred to the period of January to September 2016 – in order to validate the theoretical models, i.e., compare the 244 results generated by the models with the 244 results of Brinell hardness of 2016. It was chosen the best model.

Keywords: theoretical Brinell hardness, equivalent carbon, multiple linear regression.

1.0 INTRODUÇÃO

Estudos voltados à otimização da produtividade estão presentes na grande maioria das empresas, principalmente nas indústrias de grande porte com processos produtivos complexos, como por exemplo, as siderúrgicas. Estar em constante busca dessa otimização é essencial e de extrema importância para que o Negócio se mantenha ativo e, ao mesmo tempo, seja competitivo, já que a produtividade expressa a utilização eficiente dos recursos produtivos, tendo em vista alcançar a máxima produção no menor tempo e custos possíveis. O termo produtividade possui diversos conceitos e significados, podendo ser mensurado conforme a abordagem e autor. Porém, de modo geral, pode-se considerar que produtividade é a relação entre os resultados que são gerados por um sistema (saídas) e os recursos utilizados para obter esses resultados (entradas). Produtos fabricados, vendas, faturamento e o valor percebido pelos clientes são exemplos de saídas. Já horas trabalhadas, maquinário, capital, energia e todos os recursos utilizados para o processo produtivo são exemplo de entradas. Equalizando o conceito de produtividade, tem-se:

$$\text{Produtividade} = \frac{\text{Saídas}}{\text{Entradas}}, \text{Equação (1.1)}$$

Para obter algumas características do produto de forma mais ágil, mas também de forma confiável, o conhecimento técnico fortemente consolidado na literatura e as ferramentas da qualidade vem sendo utilizados para prever determinados resultados gerados por testes (os quais buscam caracterizar certos produtos), evidenciando a representatividade da corrida e permitindo a redução de ensaios práticos. Havendo uma diminuição da variável “Entradas” da Equação (1), devido à diminuição de horas trabalhadas e à diminuição na quantidade de insumos utilizados, tem-se um aumento na produtividade do processo.

Sendo assim, com a meta de aumentar a produtividade de uma empresa, este Trabalho de Diplomação foi desenvolvido com o objetivo geral de prever a dureza Brinell de aços para a indústria automotiva, a partir de modelos teóricos. Os objetivos específicos deste trabalho podem ser resumidos em: analisar a estabilidade dos resultados de dureza Brinell dos dados históricos, conforme os limites de especificação aceitos, analisar a

confiabilidade do equipamento que gera os valores de dureza Brinell os quais serão utilizados como banco de dados históricos para modelar as equações, bem como a confiabilidade dos dados utilizados para verificar os modelos teóricos, verificar a relação de diferentes bitolas no valor da dureza Brinell, definir quais as fórmulas de carbono equivalente são mais adequadas para este estudo, obter diferentes modelos teóricos de dureza Brinell que modelem e prevejam valores de dureza Brinell real, validar os modelos teóricos a partir de dados experimentais de dureza Brinell diferentes dos que foram utilizados para obtenção dos modelos e, por fim, definir qual modelo representa melhor os valores reais dessa dureza para esse qualidade de aço estudada.

Primeiramente, foi feita uma análise da produção da empresa para que pudesse ser visualizado onde atuar, de forma que o ganho de produtividade fosse maior, considerando também o que era viável dentro das condições da empresa. Então, definiu-se direcionar o trabalho com foco na redução de ensaio de dureza Brinell, da qualidade de aço SAE 52100, de barras laminadas sem acabamento e sem tratamento térmico.

Com a obtenção dos dados históricos dos resultados de dureza Brinell da qualidade de aço citada e da respectiva composição química, num período de três anos, foi possível modelar equações de dureza Brinell Teórica por, basicamente, dois métodos: utilização de fórmulas de carbono equivalente de diferentes autores da literatura de cunho metalúrgico com um certo fator de dureza e utilização do método de regressão linear múltipla, com auxílio do Software MiniTab. Após, foram validados os diferentes métodos, comparando os valores de dureza Brinell práticos - obtidos num período posterior a obtenção do banco de dados históricos - com os valores de dureza teóricos, gerados por cada um dos métodos.

2.0 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Processo de fabricação do aço

Fez-se necessário uma breve revisão do processo de fabricação do aço. São apresentados fluxogramas os quais possuem etapas comentadas, a fim de se obter um esclarecimento sobre o assunto.

A Figura 2.1 ilustra um resumo das principais etapas do processo siderúrgico.

Figura 2.1 Principais etapas do processo siderúrgico: Redução, Refino e Conformação Mecânica.



Fonte: Adaptado das notas de aula da disciplina de Siderurgia I, 2014 – UFRGS.

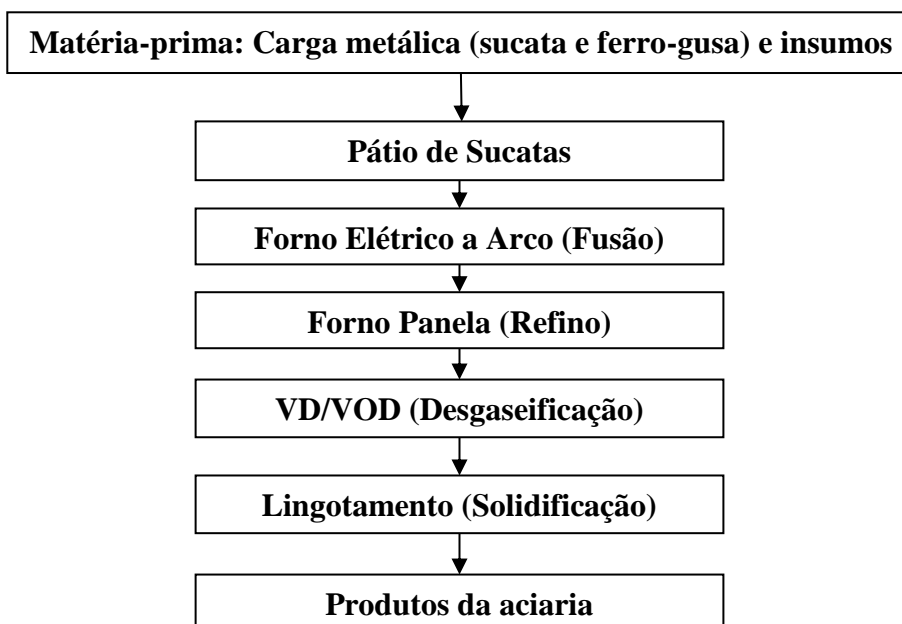
Classificação das usinas siderúrgicas: usinas não-integradas seriam usinas cujo processo de fabricação é constituído de uma só fase do processo produtivo, como por exemplo, da redução (produtores independentes de ferro-gusa), ou da conformação (relaminadores de aço). Neste caso, as usinas semi-integradas seriam aquelas que possuem processo de fabricação constituído, geralmente, pelas fases de refino e de conformação, mas, também, partem do ferro-gusa ou do ferro-esponja e da sucata para a fabricação do aço. As usinas integradas seriam aquelas que o processo de fabricação é constituído pelas fases de redução, refino e conformação – partem do minério de ferro para produção do aço (Notas de aula da disciplina de Siderurgia I, 2014 – UFRGS).

Conforme direcionamento deste trabalho, será discutido, a seguir, as etapas de fabricação do aço em uma usina semi-integrada, numa aciaria com forno elétrico à arco e que possui posterior conformação mecânica de laminação de barras e sem tratamento térmico posterior. As informações foram retiradas de uma fonte interna da Gerdau, baseadas na literatura metalúrgica.

2.1.1 Aciaria

A aciaria é composta de quatro processos básicos: Fusão, refino, desgaseificação e solidificação. Conta também com uma área de recebimento e preparação de sucatas. O fluxograma básico da aciaria é apresentado na Figura 2.2.

Figura 2.2 Fluxograma da aciaria com suas etapas.



Fonte: Fonte interna Gerdau.

Pátio de sucatas

O pátio de sucatas tem a função de receber, movimentar, estocar e processar a carga metálica (sucatas e ferro-gusa) utilizada na aciaria. Também controla os insumos para a produção do aço. Possui equipamentos para a realização do processamento da sucata (adensamento) para otimizar o processo de fusão na etapa seguinte. Possui prensas e oxicorte para aumentar a densidade da sucata e garras móveis, eletroímãs e caminhões para fazer a movimentação das mesmas. Possui uma área de estocagem de sucatas prontas e a processar bem como uma ala de carga sobre pontes rolantes ao lado da aciaria onde são armazenadas sucatas prontas para o consumo.

A carga metálica é colocada em cestões que são movimentados por pontes rolantes até o forno elétrico de fusão.

Forno elétrico à arco (Fusão)

O forno elétrico a arco é o equipamento que realiza a fusão da carga. Este processo tem a função de realizar a fusão total da carga e elevar a temperatura do aço líquido até em torno de 1650°C. A fusão é realizada pela condução de energia elétrica através de um sistema elétrico conectado a 3 eletrodos (trifásico) que transformam esta energia em calor. Nesta etapa os elementos químicos carbono e fósforo são corrigidos a níveis que se possa classificar o aço na etapa seguinte. O aço líquido de um lote de produção, já com temperatura e teores de carbono e fósforo corrigidos, é transferido para um recipiente denominado panela. Esta panela é transferida à próxima etapa do processo que é o refino secundário.

Forno panela (Refino Secundário)

A panela chegando com o aço líquido é colocada sobre um sistema composto de uma abóbada (tampa da panela) e também outros 3 eletrodos. O mesmo princípio de aquecimento da etapa anterior é aplicado neste processo. A diferença consiste em, no forno elétrico a arco, é transformada a carga metálica sólida em aço líquido e, no forno-panela, o sistema elétrico serve apenas para manter aquecido o aço durante a etapa de refino secundário. A principal função do refino é realizar a remoção do enxofre no aço e corrigir toda a composição química de acordo com as especificações de cada aço pela adição de ligas durante esta etapa. Após ser ajustada a composição química do aço o mesmo é conduzido na panela por pontes rolantes até a próxima etapa que é a desgaseificação.

Desgaseificação a vácuo do tipo VD/VOD

Em alguns aços são necessários teores bastante baixos de inclusões, nitrogênio e hidrogênio. Esses aços são levados então para um tanque onde a panela é exposta a uma atmosfera de vácuo (pressão menor do que 1atm) com injeção, no banho, de argônio ou nitrogênio (*rinsagem*). Este processo é chamado de VD (do inglês: *vacuum degassing*).

Durante o processo de desgaseificação, pode ainda ser necessário um novo refino para fazer os últimos ajustes de composição química do aço (ajuste fino), que é feito com a adição de fios de ligas metálicas.

Lingotamento (Solidificação)

Após o refino e desgaseificação, a panela é conduzida com o aço já pronto segundo os critérios pré-determinados (composição química, limpeza, temperatura e tempo de processo) para o lingotamento. Este processo visa solidificar o aço líquido e dar forma para as posteriores etapas. O lingotamento pode ser, basicamente, de dois tipos: o contínuo e o convencional.

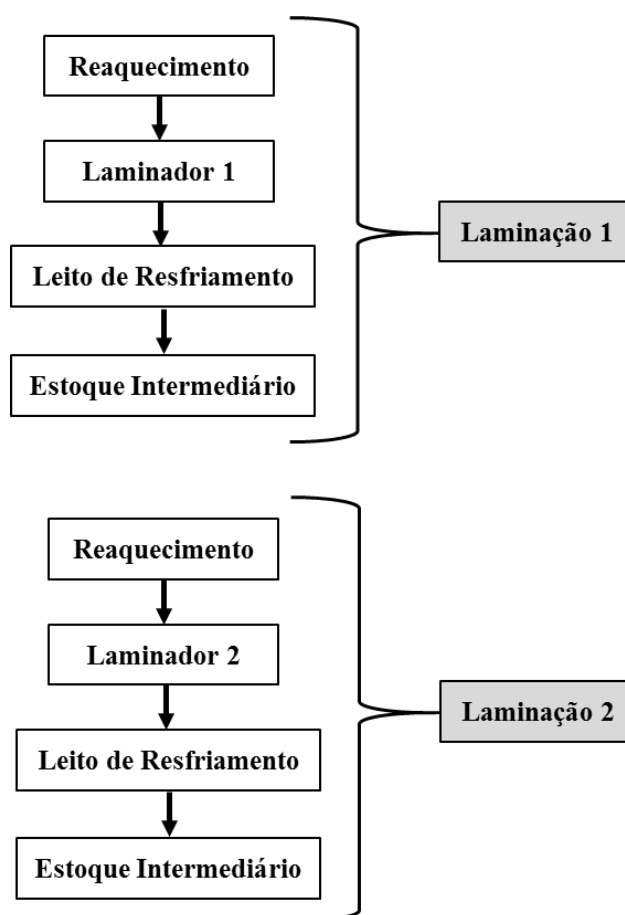
No lingotamento contínuo, a panela contendo o aço líquido na composição química especificada é colocada por pontes rolantes no topo da máquina de lingotamento contínuo. Por gravidade o aço é transferido por baixo da panela através de uma válvula refratária até o distribuidor. O distribuidor é um recipiente que tem o objetivo de dividir o aço em 3 linhas de solidificação (veios), bem como atua no processo de limpeza uma vez que estas impurezas flutam por diferença de densidade e são levadas até o topo do distribuidor enquanto o aço líquido sai pela parte inferior. Nestes três veios de solidificação, o aço líquido entra em um molde de cobre quadrado, onde é resfriado por água em sua superfície externa. A extração de calor faz com que a camada mais externa do aço dentro do molde se solidifique. Ao sair do molde o núcleo ainda líquido é contido por uma camada solidificada de aço. Continua-se a adicionar água na superfície do aço para que seu núcleo se solidifique. Após completa solidificação do aço, o mesmo é cortado com oxi-acetileno no comprimento especificado, produzindo o produto da aciaria denominado tarugo. O tarugo, que é o aço na composição química especificada e no formato especificado, é então conduzido ao próximo processo, a laminação.

Já o lingotamento convencional consiste em vaziar o aço líquido em moldes chamados de lingoteiras, produzindo os lingotes. As lingoteiras têm por finalidade extrair calor do aço líquido, provocando sua solidificação no molde desejado.

2.1.2 Laminação

O processo de laminação pode ser realizado em duas laminações (Laminação 1 e Laminação 2). O fluxograma básico do processo de laminação geral é mostrado na Figura 2.3.

Figura 2.3 Fluxograma básico do processo de laminação geral.



Fonte: Adaptado de fonte interna Gerdau.

Em alguns casos, ocorre a inspeção das barras laminadas. O fluxograma desta etapa pode ser verificado na Figura 2.4.

Figura 2.4 Fluxograma básico de inspeção de barras laminadas.



Fonte: Fonte interna Gerdau.

O processo de laminação se inicia com o reaquecimento dos tarugos, pois é necessário garantir uma temperatura específica e homogênea ao longo de todo o tarugo para cada tipo de aço laminado.

O trem laminador é dividido em três partes: trem de desbaste, trem intermediário e trem acabador.

O desbaste é feito para dar as primeiras deformações ao tarugo, preparando-o para o trem intermediário. O trem intermediário é uma etapa que reduz ainda mais a seção do laminado. Já o trem acabador é um equipamento de alta redução e alta velocidade, composto por gaiolas horizontais e verticais que dão a forma final aos produtos laminados.

O processo consiste na conformação mecânica do tarugo através da passagem em sequência entre dois cilindros que giram em sentidos opostos com canais usinados, sendo a distância entre os cilindros menor que a seção transversal da peça em processo. O material é submetido a tensões compressivas resultante da prensagem entre os dois cilindros e a tensões cisalhantes superficiais, resultantes do atrito com a superfície dos canais usinados nos cilindros.

O processo de laminação é todo realizado à quente e, ao final, o produto passa por um processo controlado de resfriamento, de acordo com as características especificadas, tais como: propriedades mecânicas, tamanho de grão e ductilidade.

As barras laminadas podem ser produzidas em barras retas, que conta com uma tesoura no final do trem de laminação que corta as barras no comprimento múltiplo especificado. Após isto, as barras seguem para o leito de resfriamento para depois serem cortadas a frio no comprimento comercial correto.

A etapa seguinte consiste da inspeção dos produtos laminados. As barras são inspecionadas em uma linha de inspeção, que detecta defeitos superficiais e internos. A última etapa consiste na pesagem do produto pronto, na sua identificação e colocação da embalagem para posteriormente ser encaminhado ao estoque. Os produtos estão prontos para serem comercializados ou usados em etapas seguintes de produção.

2.2 Efeito dos Elementos de Liga

Os efeitos dos elementos de liga nos aços envolvem alterações nas fases, nos constituintes presentes em equilíbrio, na maneira e velocidade com que as fases se formam e, por fim, podem causar alterações nas características próprias das fases presentes (SILVA, 2010).

É importante mencionar que os efeitos dos elementos de liga devem ser suficientemente claros quando se menciona que um elemento causa tal efeito, caso contrário, haverá muita controversa relacionada a isso, já que, em pequenas quantidades, os elementos de liga causam inúmeros efeitos. Em aços ao carbono, usados como base de comparação, na maioria das vezes, os elementos de liga geralmente são menores que 1% e seus efeitos nas propriedades podem não ser tão visíveis, exceto para o caso do Manganês cujos efeitos já são visíveis até mesmo em baixos teores (BAIN, 1939).

Uma excelente visão sob o ponto de vista da metalurgia física relacionada aos efeitos dos elementos de liga pode ser encontrado na obra de GROSSMANN, 1935 (BAIN, 1939).

Pretende-se realizar uma classificação dos elementos de liga quanto às suas funções básicas no aço e, conseqüentemente, em suas propriedades, independente do tipo de aço que esteja em questão, isto é, independente se é um aço rolamento, para construção civil, mecânica, etc (BAIN, 1939).

Constata-se que um elemento de liga não contribui para características nas propriedades do aço apenas pela sua presença. Deve-se considerar a estrutura favorecida em certas circunstâncias específicas (BAIN, 1939).

Sendo assim, é evidente que uma análise dos efeitos que os elementos de liga causam no aço é uma tarefa complexa (SILVA, 2010).

Na Tabela 2.1 estão listadas algumas principais características alteradas pelos elementos de liga (BAIN, 2010):

Tabela 2.1 Principais características alteradas peloos elementos de liga.

Aprimoramento das Propriedades Mecânicas
1. Aumento da resistência do aço fabricado.
2. Aumento da dureza ou plasticidade no aço a qualquer dureza ou resistência mínima.
3. Aumento da seção máxima admissível que pode ser endurecida por têmpera conforme as propriedades desejadas.
4. Diminuição da capacidade de endurecimento por têmpera.
5. Aumento na taxa de endurecimento com o trabalho à frio.
6. Diminuição da plasticidade a uma dada dureza no interesse da usinabilidade.
7. Aumento da resistência à abrasão ou da capacidade de corte.
8. Diminuição na deformação e trincas com o desenvolvimento da dureza desejada.
9. Melhoria das propriedades físicas em altas ou baixas temperaturas.
Aprimoramento das Propriedades Magnéticas
1. Aumento da permeabilidade inicial e da indução máxima.
2. Diminuição na força coercitiva, histerese e perda de watt (ferro magnético " macio ").
3. Diminuição da força coercitiva e remanência (ímas permanentes).
4. Diminuição de todas as respostas magnéticas.
Aprimoramento da Inércia Química
1. Diminuição da oxidação em ambiente úmido.
2. Diminuição do ataque a altas temperaturas.
3. Diminuição do ataque por reagentes químicos.

Fonte: BAIN, 1939.

É importante salientar que um mesmo elemento de liga pode se apresentar sob mais de uma única forma no aço, como por exemplo, Nb, que pode estar parcialmente dissolvido

na ferrita, na forma de carbonitretos ou de carbonetos e, ainda, formando óxidos. Tudo numa mesma amostra de aço (SILVA, 2010).

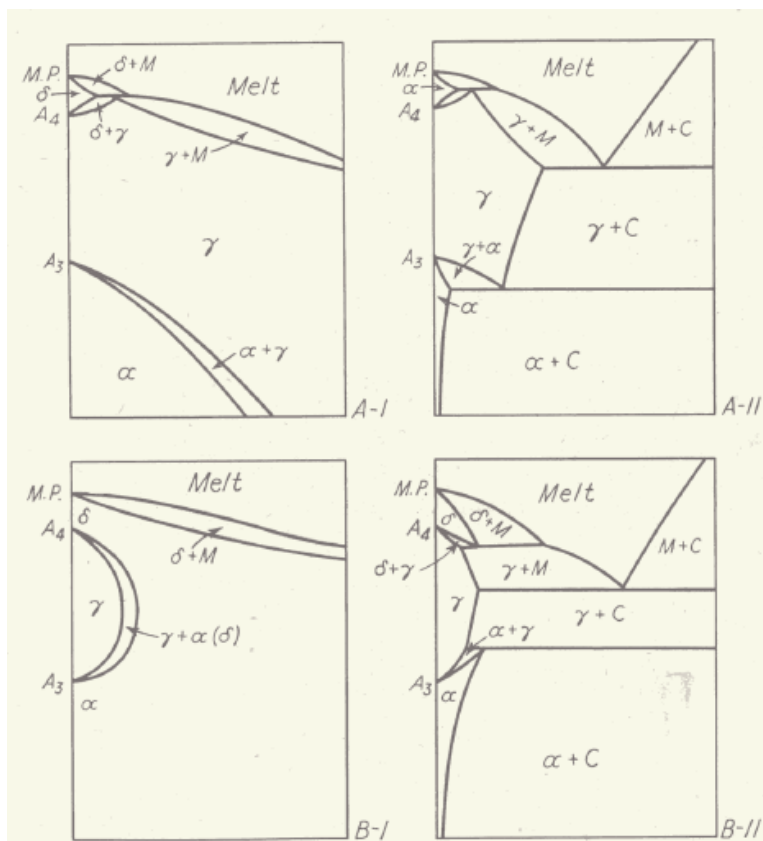
Como este Trabalho de Diplomação está focado no aço SAE 52100, os subcapítulos sobre os efeitos dos elementos de liga irão se ater mais fortemente às variáveis que alteram as características desse aço.

2.2.1 Efeito dos elementos de liga na estabilização da austenita e da ferrita

De acordo com o diagrama de equilíbrio binário com o ferro, os elementos de liga pode ser classificação em 2 grupos: Grupo A, que compõe os estabilizadores da austenita. E Grupo B, que compõe os estabilizadores da ferrita. Estabilizador de um dos campos, austenítico ou ferrítico, significa que a presença do elemento aumenta a faixa de temperatura na qual a fase é estável (BAIN, 1939).

Ainda existem os subgrupos: A-I, A-II, B-I e B-II, os quais podem ser visualizados na Figura 2.5 (BAIN, 1939).

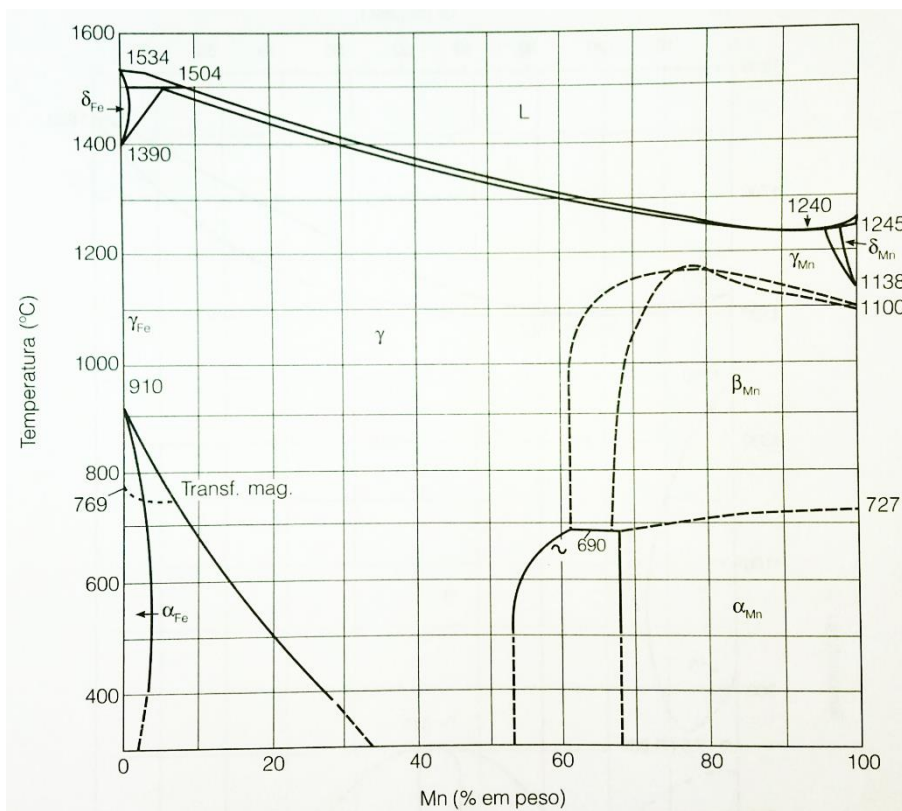
Figura 2.5 Os dois grupos, A e B, e as subdivisões, I e II dos diagramas de equilíbrio de fases para liga de ferro.



Fonte: BAIN, 1939.

- Tipo A-I (ou campo austenítico aberto): é composto pelos elementos de liga que aumentam a faixa de temperatura para a austenita estável. Ni, Mn e Co são elementos pertencentes a esse grupo. Um exemplo de diagrama de um dos elementos desse grupo está ilustrado na Figura 2.6 (BAIN, 1939).

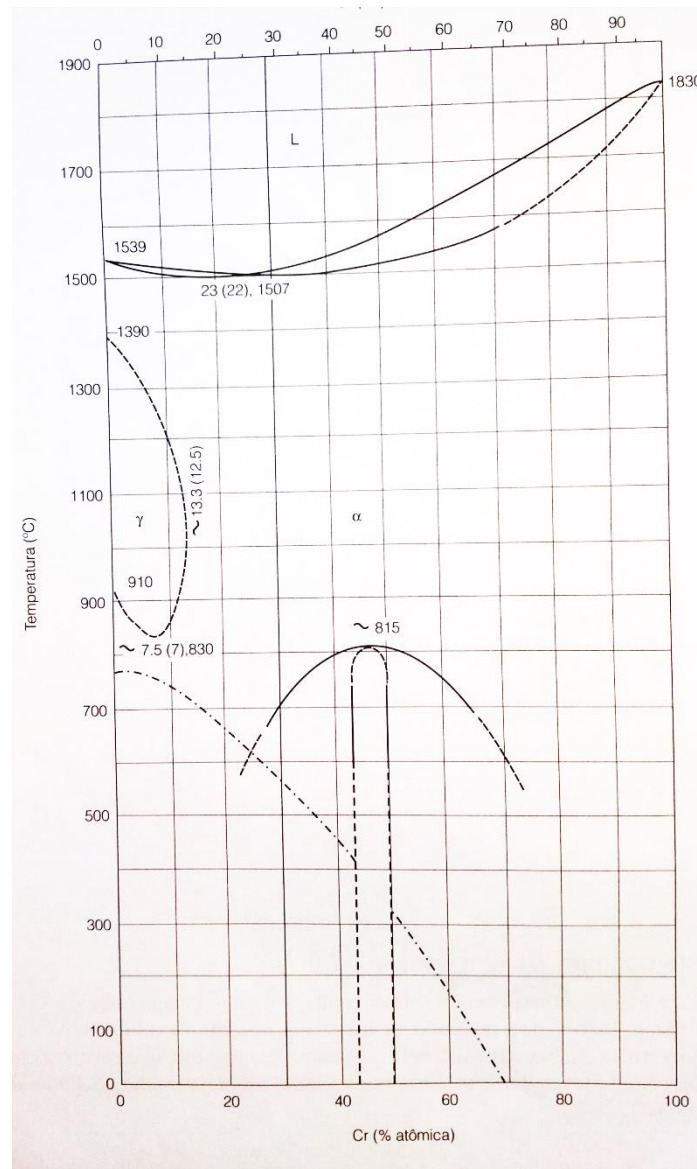
Figura 2.6 Diagrama de equilíbrio Ferro-Manganês.



Fonte: SILVA, 2010.

- Tipo A-II (ou campo austenítico aberto): é composto por C e N. Ocorre que o campo austenítico, na presença de um desses elementos, é expandido até a formação de um composto de ferro (um diagrama Fe-C pode ser consultado para maior clareza). Um exemplo de diagrama que contenha um desses elementos pode ser verificado na Figura 2.7 (SILVA, 2010). Podem também pertencer a este grupo os elementos Cu, Zn e Au. (BAIN, 1939).

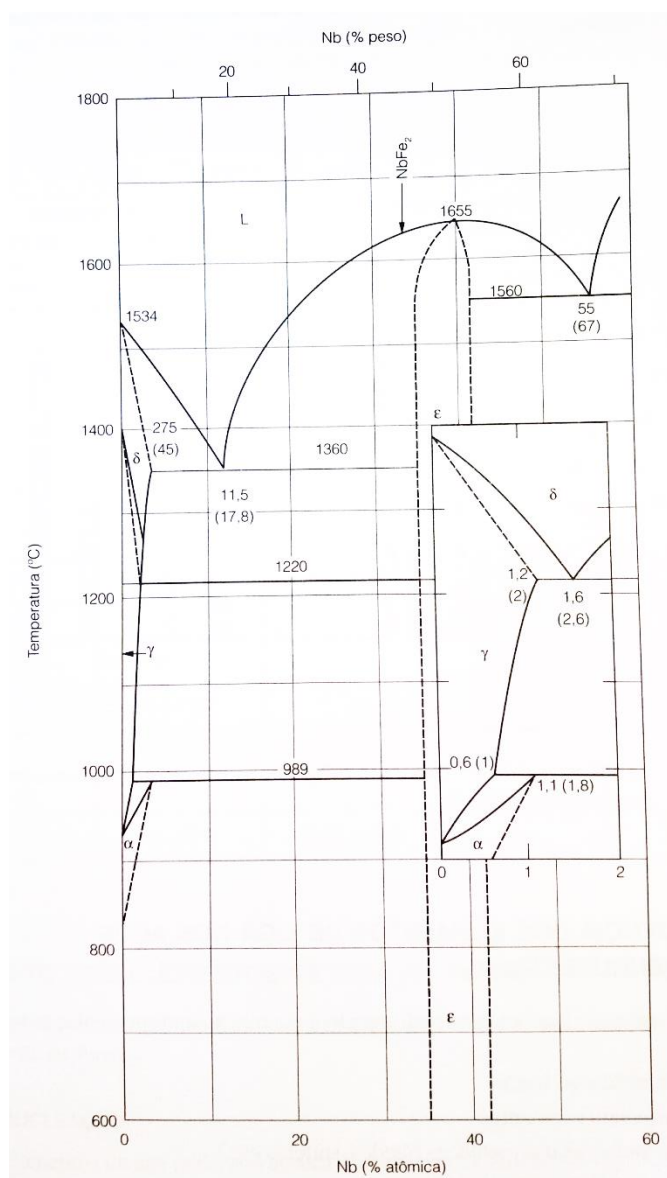
Figura 2.7 Diagrama de equilíbrio Ferro-Cromo.



Fonte: SILVA, 2010.

- Tipo B-I (ou campo austenítico fechado): pertence a este grupo os elementos que favorecem a expansão do campo ferrítico, restringindo a formação da austenita. O campo austenítico fica totalmente circundado pela região ferrítica. São eles: Si, Al, Be, P, Ti, V, Mo e Cr (esses quatro últimos são fortemente formadores de carbonetos). A Figura 2.8 ilustra um exemplo de diagrama com elementos pertencentes a este grupo. (SILVA, 2010). Ainda podem pertencer a este grupo os elementos W, Sn, Sb e As (BAIN, 1939).

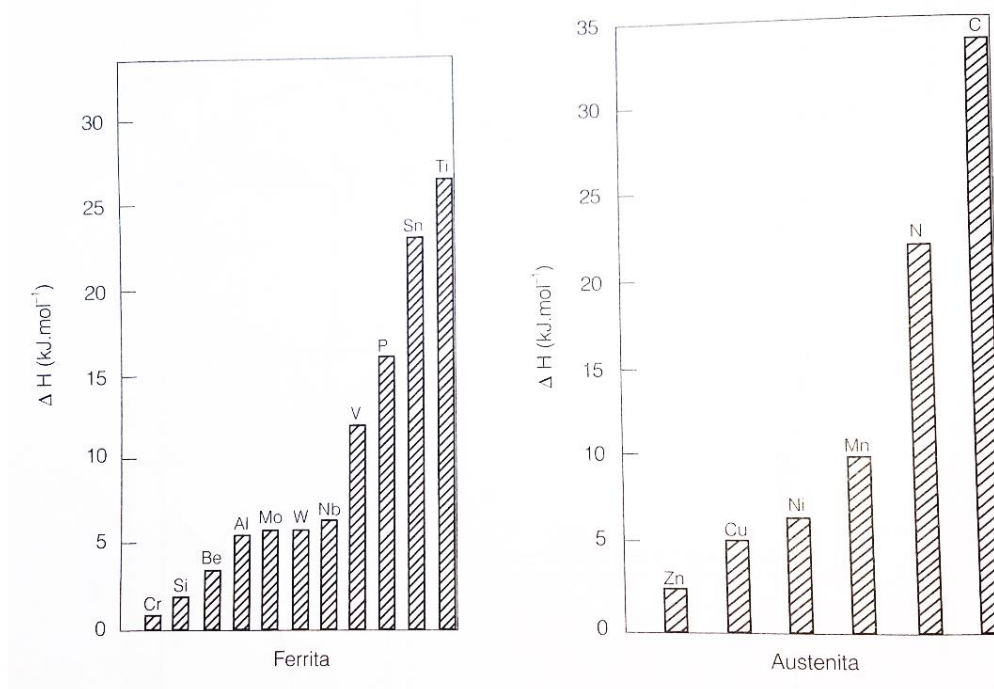
Figura 2.8 Diagrama de equilíbrio Ferro-Nióbio.



Fonte: SILVA, 2010.

Um resumo dos elementos de liga atuando na expansão do campo ferrítico ou austenítico pode ser visualizado na Figura 2.9, a qual ilustra uma tendência relativa em termos de entalpia para a formação da ferrita ou da austenita (SILVA, 2010).

Figura 2.9 Tendência relativa dos elementos de liga, em termos de entalpia, para a formação da ferrita e da austenita.



Fonte: SILVA, 2010.

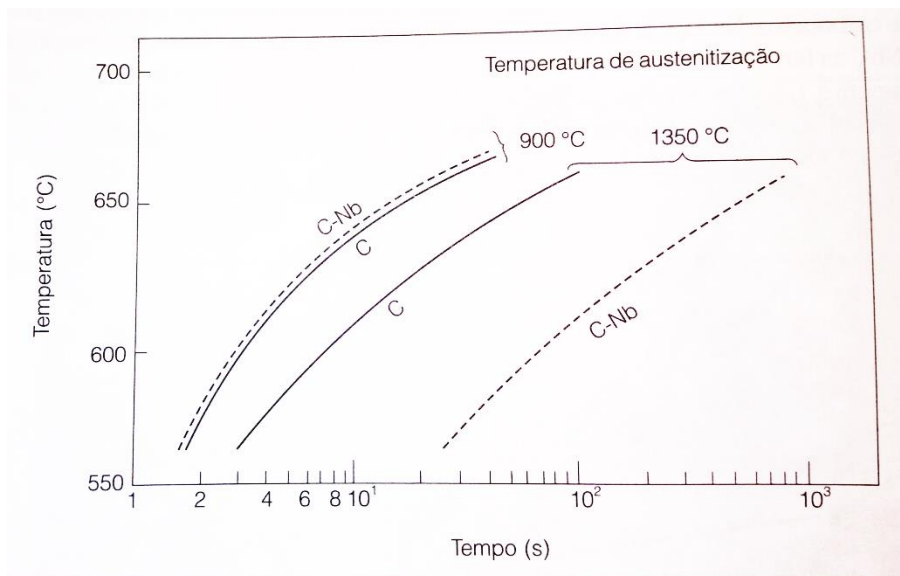
2.2.2 Efeito dos elementos de liga na formação da perlita

É possível que ocorra atraso na nucleação e no crescimento da perlita devido à presença de elementos de liga dissolvidos na austenita. As causas que explicam esse atraso quanto a nucleação são: formação de um filme fino de precipitados, podendo ser da família de nitretos, carbonetos ou carbonitretos. A segunda causa seria devido à segregação de elemento de liga ou a soma de cossegregação do carbono com o elemento de liga. Já as hipóteses para explicar o atraso quanto ao crescimento da perlita seriam: partição, segregação, efeito de arrasto de soluto (Solute Drag Effect), precipitação de carbonetos, ou uma combinação de mecanismos (SILVA, 2010).

Esse atraso gerado na formação da perlita está relacionado ao fato de elementos de liga se dissolverem ou não no grão austenítico, que por sua vez está intimamente relacionado à temperatura de austenitização. Um exemplo prático é o caso do Nióbio, que num aço com 0,8% de Carbono e austenitizado a 900 °C, apresenta 3% de solubilização. Nesse caso, não há atraso na formação da perlita. Já se a temperatura, nesse mesmo exemplo, for 1350 °C, todo o Nióbio estará solubilizado, gerando um atraso na formação da perlita em dez vezes

mais. A Figura 2.10 ilustra o exemplo de 0,003% de Nióbio na formação da perlita, conforme a temperatura de austenitização (SILVA, 2010).

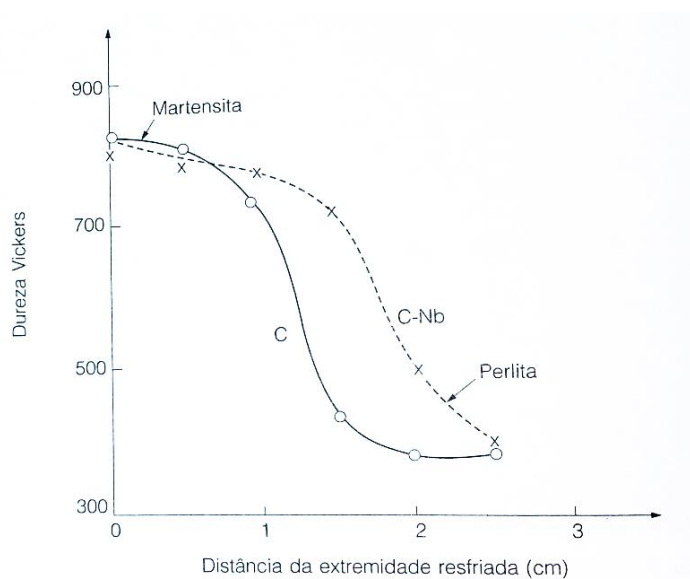
Figura 2.10 Início da formação da perlita (1%) em aço com 0,03% de Nióbio e sem Nióbio após austenitização a 900 °C e 1350 °C em aço com 0,8% de Carbono. Tamanho de grão = 1 mm.



Fonte: SILVA, 2010.

Para aços que não possuem o Nióbio, o principal motivo do atraso se deve ao crescimento de grão austenítico, quando a temperatura de austenitização vai de 900 °C para 1350 °C. Esse caso pode ser verificado na Figura 2.11, que ilustra a temperabilidade de um aço com 0,85% de Carbono, com e sem 0,003% de Nióbio (SILVA, 2010).

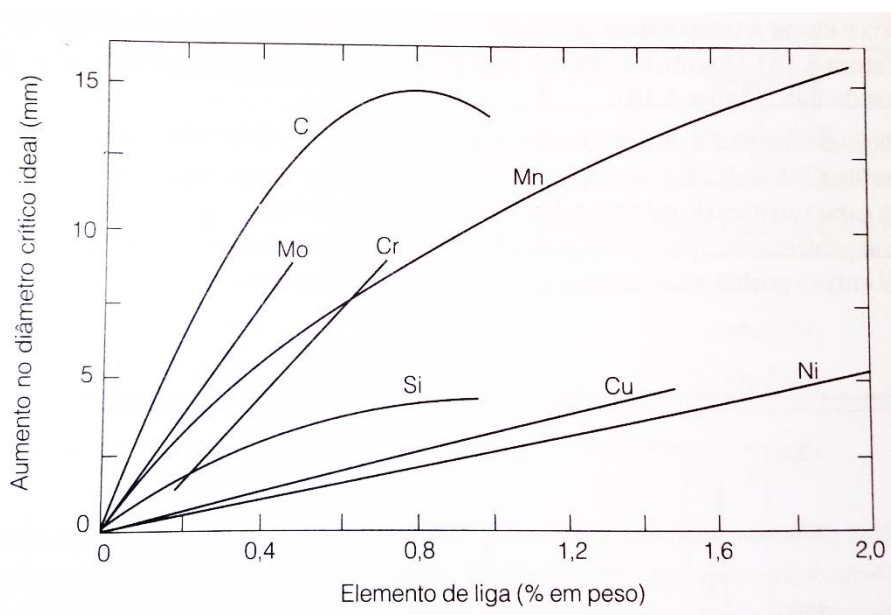
Figura 2.11 Curva de temperabilidade (não padronizada) dos aços 0,85% C com e sem adição de 0,03% Nb, austenitizada a 1350 °C.



Fonte: SILVA, 2010.

Conforme relatado, o crescimento da perlita é afetado pela presença de elementos de liga, gerando atraso na sua formação – assim como um atraso na formação da ferrita - logo, significa um aumento na temperabilidade do aço, como pode ser verificado na Figura 2.12 (SILVA, 2010).

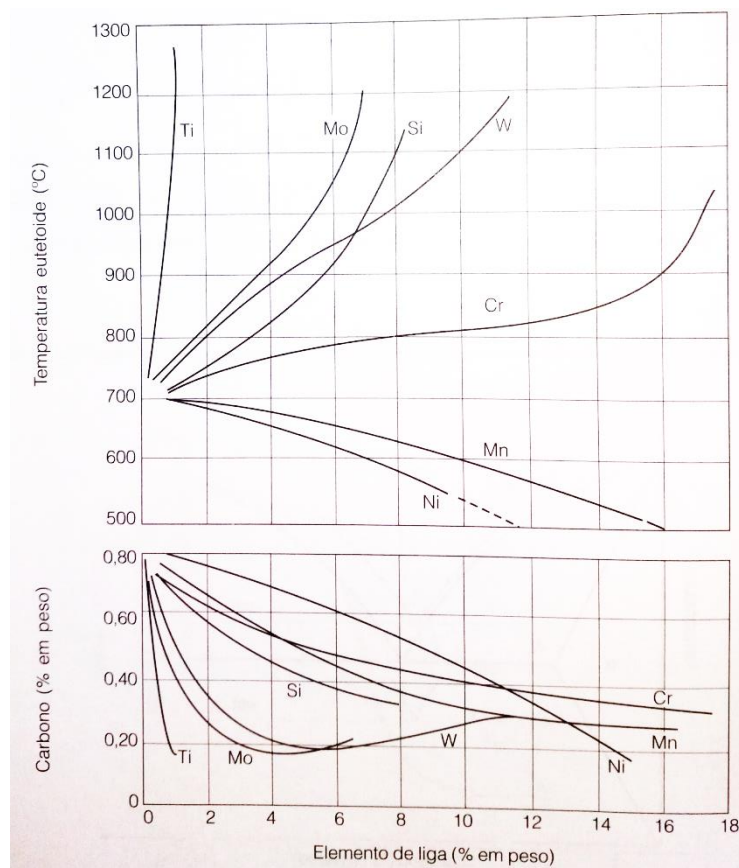
Figura 2.12 Efeito dos elementos de liga no aumento da temperabilidade dos aços.



Fonte: SILVA, 2010.

Quanto à temperatura e à composição eutetóide. A composição é sempre reduzida ao se adicionar elementos de liga. Já a temperatura eutetóide tende a se elevar conforme a adição de elementos de liga estabilizadores de ferrita. Esses efeitos podem ser verificados na Figura 2.13, a qual demonstra a relação dos elementos de liga com a temperatura eutetóide e com a composição eutetóide (SILVA, 2010).

Figura 2.13 Influência dos elementos de liga na temperatura e composição eutetóide do diagrama Fe-C.



Fonte: SILVA, 2010.

O espaçamento interlamelar (S_0) da perlita também é interferido pela adição dos elementos de liga. Houve uma tentativa de relacionar elementos estabilizantes da ferrita e da austenita com esse espaçamento interlamelar, porém, ele depende também de outros fatores. A Tabela 2.2 demonstra essa relação (SILVA, 2010).

Tabela 2.2 Efeito dos elementos de liga no espaçamento interlamelar da perlita.

Elemento	Estabilizador	Efeito no S_0
Co	Austenita	↓
Mn	Austenita	↑
Ni	Austenita	↑
Si	Ferrita	↓
Cr	Ferrita	Nenhum
Nb	Ferrita	↑

Fonte: SILVA, 2010.

2.2.3 Efeito dos elementos de liga nos carbonetos

Da mesma forma que a ferrita (ferro alfa contendo elementos dissolvidos), materiais não metálicos, compostos intermetálicos e o próprio elemento de liga adicionado sob forma metálica, os carbonetos são um tipo de constituinte possivelmente encontrados em aços recozidos. Os principais formadores de carbonetos são: Mn, Cr, Mo, W, Ta, V, Nb e Ti. Os de menor tendência em relação ao Ferro para combinar-se com o Carbono são: Si, Al, Cu, Ni, Co e, possivelmente, o Zr. É importante salientar que a presença e quantidade de carbonetos está intimamente relacionada a altos teores de Carbono. Exemplos de carbonetos: $(FeCr)_3$, $(CrFe)_7C$, $(FeMo)_6Cr$, $(VFe)_4C_3$ (CHIAVERINI, 2005).

A presença de carbonetos nos aços influencia suas propriedades, conforme sua quantidade, forma e finura que se apresenta. Os carbonetos são um dos constituintes básicos nos aços resfriados lentamente. Mesmo sendo encontrados em aços extremamente duros e frágeis, com relação à tração, esta propriedade é pouco modificada por eles, claro que, comparando-se mesmo grau de dispersão e demais parâmetros (CHIAVERINI, 2005).

É importante que a forma dos carbonetos seja fina e estejam distribuídos de modo disperso na matriz do aço, pois somente desta forma, irão efetivamente aumentar a dureza.

Outros efeitos devido à precipitação dos carbonetos finos ($< 100 \text{ \AA}$) nos aços do tipo Nb (C, N) são (SILVA, 2010):

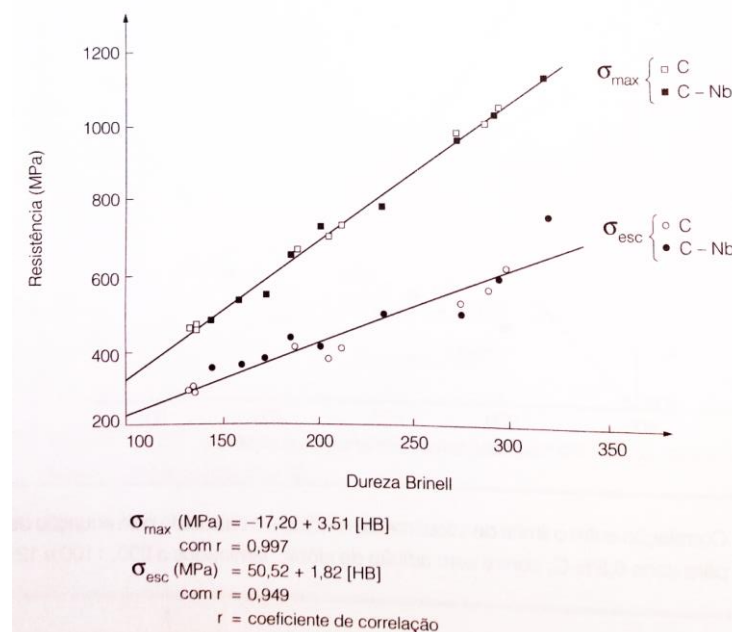
- Atraso na recristalização e recuperação da austenita;
- Impedimento do crescimento do grão austenítico;

- Aumento da tensão de escoamento da austenita na laminação;
- Endurecimento da ferrita.

Efeito dos carbonetos na laminação para aços com alto teor de Carbono

Para entender os efeitos dos elementos que formarão carbonetos, é essencial conhecer seus mecanismos de atuação. Por exemplo, o aumento da resistência mecânica em aços com 0,2% de Carbono é devido a uma causa diferente da gerada num aço com 0,4% de Carbono, que, também, é diferente da causa num aço com 0,8% de Carbono. De modo geral, o aumento da dureza da perlita num aço com 0,8% de Carbono, com a presença de Nióbio, é devido ao fato de o Nióbio estar em solução sólida atrasar a formação da perlita, fazendo com que esta fase ocorra em temperaturas menores, o que reduz o espaçamento interlamelar e causa um aumento na dureza. Há hipóteses de que a degeneração da perlita também contribua para aumentar sua dureza. A Figura 2.14 ilustra uma correlação linear forte entre os limites de escoamento e de resistência com a dureza Brinell, independente do aço conter ou não Nióbio, para aços com 0,2%, 0,4% e 0,8% de Carbono. Pode-se, com esses gráficos, estimar a resistência mecânica a partir da dureza Brinell (SILVA, 2010).

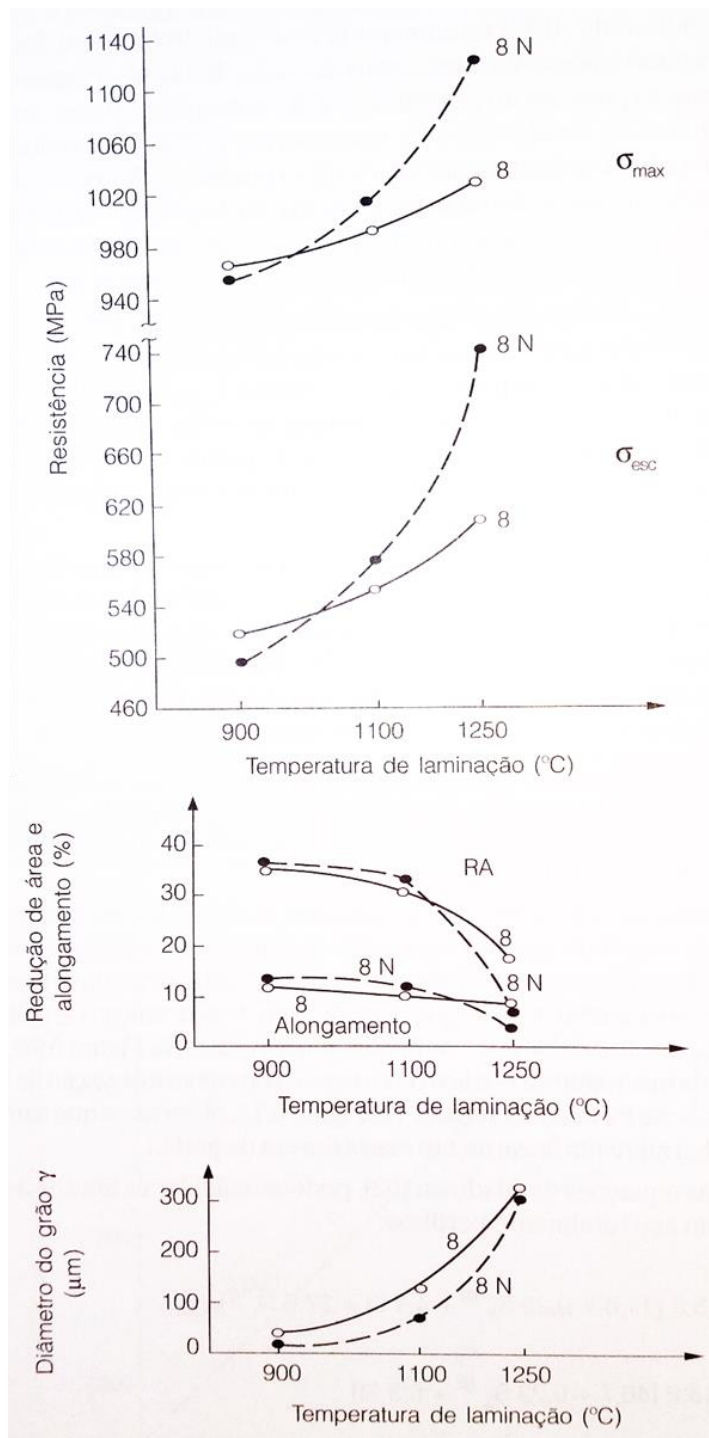
Figura 2.14 Correlação entre a resistência mecânica de aços 0,2; 0,4; 0,8% C, com ou sem adição de Nióbio, e a dureza Brinell após laminação em diferentes temperaturas e resfriamento ao ar.



Fonte: SILVA, 2010.

Com a elevação da temperatura de laminação, nota-se um aumento expressivo dos limites de resistência e de escoamento, porém, uma redução significativa da ductilidade, para aços com teore de 0,8%, 0,2% de Carbono e 0,4% de Carbono, submetidos ao mesmo tratamento. Isso para aços com e sem Nióbio, visto que há um aumento expressivo do tamanho de grão austenítico, o que dificulta a nucleação da perlita, possibilitando sua formação em temperaturas menores no resfriamento contínuo, elevando seu espaçamento intergranular e, assim, aumentando a resistência mecânica. A Figura 2.15 mostra as propriedades mecânicas e o tamanho de grão austenítico de aços com 0,8% de Carbono, com ou sem adição de Nióbio, após a laminação em diferentes temperaturas, seguido de resfriamento ao ar (SILVA, 2010).

Figura 2.15 Propriedades mecânicas e tamanho de grão austenítico de aços 0,8% C, com ou sem adição de 0,026% Nb, após a laminação em diferentes temperaturas seguida de resfriamento ao ar. Redução total de 34% aplicada em dois passes.



Fonte: SILVA, 2010.

2.2.4 Efeito dos elementos de liga na têmpera

Podem influenciar nos aços temperados da seguinte maneira (SILVA, 2010):

- Alterando as temperaturas de início (M_I) e fim (M_F) da transformação martensítica;

- Aumentando a dureza da martensita;
- Alterando a temperabilidade.

Quanto às temperaturas M_I e M_F , pode-se estimar em termos de °C qual a sua influência (SILVA, 2010):

$$MI (^{\circ}C) = 539 - 423 (\%C) - 30,4(\%Mn) - 17,7(\%Ni) - 12,1(\%Cr) - 7,5(\%Mo), \text{Equação (2.1), com \% dos elementos em massa.}$$

2.2.5 Efeito dos elementos de liga: particularidades de cada elemento

Em aços resfriados normalmente (transformação total da austenita), à medida que o teor de Carbono aumenta, há um aumento nas propriedades mecânicas, isto é, aumento na dureza, no limite de resistência mecânica e no limite de escoamento. Em contrapartida, há uma diminuição nas propriedades relativas à tenacidade e à ductilidade, ou seja, o alongamento, a estrição e a resistência ao choque diminuem (CHIAVERINI, 2005).

Há inúmeras características específicas que diferentes elementos químicos podem vir a afetar nos aços relacionadas às propriedades mecânicas. A Tabela 2.3 ilustra um resumo de cada elemento com cada uma de suas possíveis influências (SILVA da, 2006).

Tabela 2.3 Efeitos específicos de alguns elementos de liga nos aços.

Elemento	Solubilidade Sólida		Influência sobre a Ferrita	Influência sobre a Austenita (Endurecibilidade)	Influência exercida através dos carbonetos		Principais funções
	No ferro γ	No ferro α			Tendência formadora de carbonetos	Ação durante o revenido	
Cr	12,8% (20% com 0,5% C)	Sem limites	Endurece ligeiramente; aumenta a resistência à corrosão	Aumenta a endurecibilidade moderadamente	Maior que o Mn Menor que o W	Moderada Resiste à diminuição de dureza	1 - Aumenta a resistência à corrosão e à oxidação 2 - Aumenta a endurecibilidade 3 - Melhora a resistência a altas temperaturas 4 - Resiste ao desgaste (com alto C)
Co	Sem limites	75%	Endurece consideravelmente por solução sólida	Diminui a endurecibilidade no estado dissolvido	Semelhante ao Fe	Sustenta a dureza pela solução sólida	1 - Contribui à dureza à quente pelo endurecimento da ferrita
Mn	Sem limites	3%	Endurece acentuadamente - reduz um tanto a plasticidade	Aumenta a endurecibilidade moderadamente	Maior que o Fe Menor que o Cr	Muito pequena nos teores normais	1 - Contrabalança a fragilidade devida ao S 2 - Aumenta a endurecibilidade economicamente
Mo	3% (8% com 0,3%C)	37,5%	Produz o sistema endurecível por precipitação nas ligas Fe-Mo	Aumenta a endurecibilidade fortemente (Mo > Cr)	Forte, maior que o Cr	Opõe-se à diminuição de dureza criando a dureza secundária	1 - Eleva a temperatura de crescimento de grão de austenita 2 - Produz maior profundidade de endurecimento 3 - Contrabalança a tendência à fragilidade de revenido 4 - Eleva a dureza a quente, a resistência a quente e a fluência 5 - Melhora a resistência à
Ni	Sem limites	10% (sem relação com o teor de carbono)	Aumenta a resistência e a tenacidade por solução sólida	Aumenta a endurecibilidade ligeiramente; mas tende a reter a austenita com C mais elevado	Negativa (grafitiza)	Muito pequena em teores baixos	1 - Aumenta a resistência de aços recozidos 2 - Aumenta a tenacidade de aços ferríticos-perlíticos (sobretudo a baixas temperaturas) 3 - Torna austeníticas ligas Fe-Cr altas em Cr
Si	2% (9% com 0,35%C)	18,5% (não muito alterada pelo C)	Endurece com perda de plasticidade (Mn < Si < P)	Aumenta a endurecibilidade moderadamente	Negativa (grafitiza)	Sustenta a dureza pela solução sólida	1 - Desoxidante 2 - Elemento de liga para chapas elétricas e magnéticas 3 - Aumenta a resistência à oxidação
W	6% (11% com 0,25%C)	33%	Idem em ligas W - Fe com alto W	Aumenta a endurecibilidade fortemente em pequenos teores	Forte	Opõe-se à diminuição de dureza por endurecimento secundário	1 - Forma partículas duras e resistentes ao desgaste em aços-ferramenta 2 - Promove dureza e resistência a altas temperaturas
V	1% (4% com 0,20%C)	Sem limites	Endurece moderadamente por solução sólida	Aumenta muito fortemente a endurecibilidade do estado dissolvido	Muito forte (V < Ti ou Cb)	Máxima para endurecimento secundário	1 - Eleva a temperatura de crescimento de grão da austenita (promove refino de grão) 2 - Aumenta a endurecibilidade (quando dissolvido) 3 - Resiste ao revenido e causa acentuado endurecimento secundário

Fonte: SILVA da, 2006.

2.2.6 Efeito dos elementos de liga na microestrutura

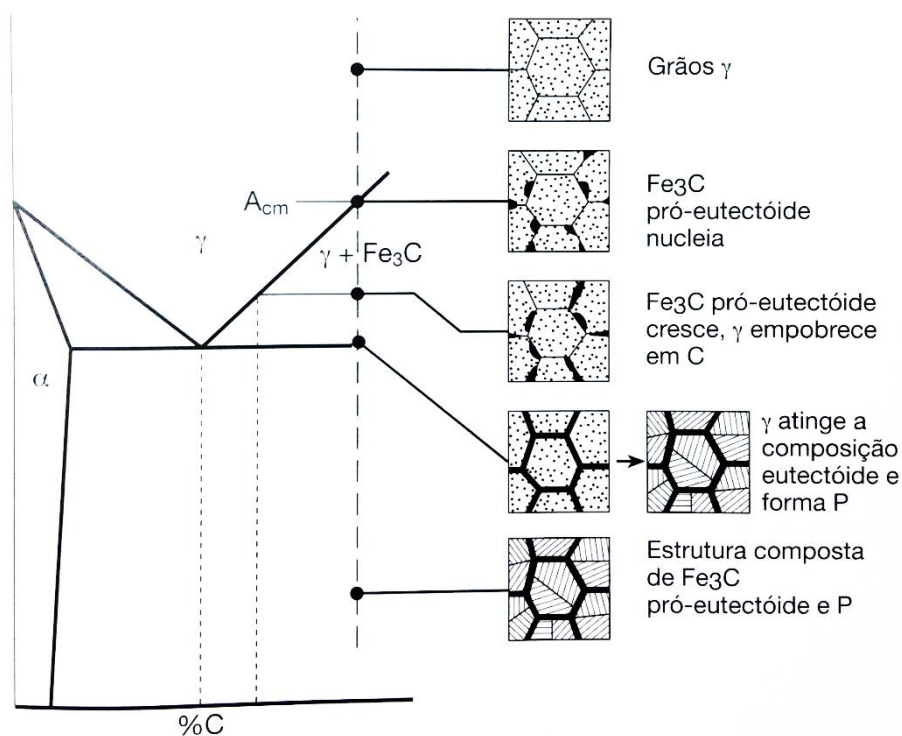
Sabe-se que o diagrama binário Ferro-Carbono é utilizado para prever fases formadas no aço contanto que sejam mantidas condições de equilíbrio termodinâmico, destacando-se a importância de o resfriamento ser de forma lenta, isto é, no forno ou com uma manta térmica ao ar. Caso o resfriamento for de forma mais intensa (em óleo ou em água), fases metaestáveis far-se-ão presentes, como por exemplo, martensita, bainita inferior e superior, etc. Essas fases não estão previstas nesse diagrama de fases binário (SILVA, 2010; COLPAERT, 2008).

Os aços hipereutetóides, ou seja, aqueles cujo teor de Carbono é mais do que 0,77%, pode ocorrer a formação de rede de cementita pró-eutetóide. A temperatura de austenitização destes aços é ajustada para que não haja austenitização completa e, conseqüentemente, formação da cementita em rede, nos contornos de grão da austenita (COLPAERT, 2008).

Esses aços possuem, no geral, microestrutura composta de perlita (assim chamada a “fase” composta da fase ferrita e do composto intermetálico, cementita – Fe_3C) juntamente com a fase cementita. A microestrutura fica disposta da seguinte forma: perlita (ferrita, também chamada de ferrita eutetoide, com lamelas de cementita) e a cementita, essa chamada de cementita pró-eutetóide, já que se formou antes da temperatura eutetóide (CHIAVERINI, 2005; COLPAERT, 2008; SILVA, 2010).

A Figura 2.16 mostra a evolução da formação da microestrutura de um aço hipereutetoide, com resfriamento lento, desde a temperatura de austenitização até a temperatura ambiente.

Figura 2.16 Representação esquemática da transformação da austenita em cementita pró-eutetóide e perlita (P) em aço composição hipereutetóide em condições próximas ao equilíbrio.



Fonte: COLPAERT, 2008.

É claro que, conforme a adição de elementos de liga, o Diagrama Ferro-Carbono fica afetado, isto é, distorcido em relação a exatidão de formação de fases. Porém, o aço tratado neste Trabalho de Diplomação é o aço SAE 52100, este considerado aço baixa liga (segundo Norma ABNT 6006, em que a soma dos elementos de liga não deve ultrapassar 6% em massa do valor total), logo, a microestrutura base continua sendo perlita e cementita nos contornos de grão.

2.3 Microestrutura e Tratamento Térmico

O fator inicial para afetar a microestrutura, conforme já mencionado no subcapítulo anterior, é a composição química, já que ela definirá se o aço será hipoeutetóide, eutetóide, ou hipereutetóide – constituintes presentes: ferrita e perlita, perlita e cementita, ou apenas perlita. Porém, a microestrutura também depende de (CHIAVERINI, 2005):

- Condição de produção do aço: se fundido, trabalhado a quente (forjado, laminado, etc.), ou trabalhado a frio (encruado). Este estado de produção do aço também irá determinar fortemente a microestrutura formada, como por exemplo, se o aço for fundido, sua granulação será grosseira do tipo dendrítico. Já se o aço for laminado a quente, ou forjado,

há uma homogeneização da estrutura, eliminando ou reorientando as inclusões e segregações, destruição da estrutura dendrítica e recristalização e, geralmente, redução do tamanho de grão. Outras mudanças visíveis se destacam para aços que são encruados ou trabalhados à frio, mas não serão citadas aqui.

- Tamanho de grão austenítico afeta diretamente as propriedades dos aços e alguns destes efeitos podem ser visualizados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 Efeito do tamanho de grão austenítico sobre certas características dos aços.

PROPRIEDADE	TENDÊNCIAS NOS AÇOS TEMPERADOS	
	Aços de Austenita Grosseira (n ^a 5 e acima)	Aços de Austenita Fina (mais fina do que n ^a 5; de 5 a 8)
Endurecibilidade	Endurecimento mais profundo	Endurecimento menos profundo
Tenacidade à mesma dureza	Menos tenazes	Mais tenazes
Empenamento	Maior	Menor
Fissuras de têmpera	Mais frequente	Geralmente ausentes
Fissuras de retificação	Mais susceptíveis	Menos susceptíveis
Tensões Residuais	Maiores	Menores
Austenita retida	Mais	Menos
	<u>NOS AÇOS RECOZIDOS E NORMALIZADOS</u>	
Usinabilidade	(Desbaste) melhor	(Desbaste) inferior
Usinabilidade (casos especiais)	(Acabamento fino)	(Acabamento fino)
Trabalhabilidade (casos especiais)	Inferior	Melhor
	Superior	Inferior

Fonte: CHIAVERINI, 2005.

- Tratamento térmico é, sem dúvida, um forte fator que modifica a microestrutura dos aços, do mesmo modo que a taxa de resfriamento aplicada.

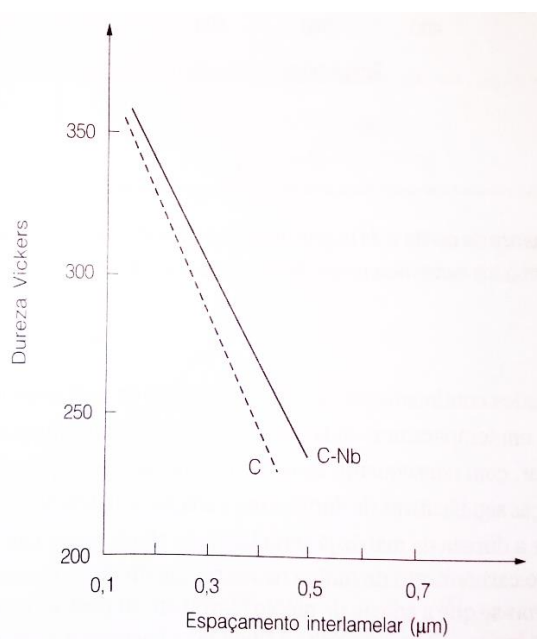
2.3.1 Perlita e cementita

A microestrutura de aços hipereutetóides, conforme já discutido, é perlita com cementita. A perlita não é uma fase e, sim, uma mistura de duas fases: ferrita pró-eutetoide e cementita. A ferrita possui estrutura CCC e, conseqüentemente, menos compacta, se comparada à austenita (CFC), apresentando interstícios octaédricos, assim, dissolvendo menor quantidade de Carbono. O Carbono rejeitado pela ferrita, dá origem à cementita (Fe_3C) (SILVA, 2010).

A formação da perlita, crescimento e nucleação, vem de duas hipóteses, a de Mehl e, outra, de Hillert. Posteriormente, Dippenaar e Honeycombe (1973) postularam novas hipóteses para a formação dessa “fase”. Para maiores detalhes, acessar conteúdo na obra de SILVA, 2010.

Ainda sobre a perlita, seu espaçamento interlamelar – que é por sua vez afetado pelos elementos de liga, conforme relação da Tabela 2.2 - influenciará nas propriedades mecânicas do aço. À medida que se diminui a temperatura de formação da perlita, seu espaçamento interlamelar é reduzido e, portanto, há um aumento no valor de dureza do aço. Esse efeito pode ser verificado na Figura 2.17, em que relata a redução da dureza em Vickers conforme há um aumento no espaçamento interlamelar (SILVA, 2010).

Figura 2.17 Variação da dureza da perlita com o espaçamento interlamelar para aços 0,85% C com e sem adição de 0,03% Nb.



Fonte: SILVA, 2010.

A perlita apresenta maior dureza e resistência que a ferrita, mas ao mesmo tempo é mais branda e maleável que a cementita, o que garante uma boa dureza aos aços baixa liga juntamente com uma certa tenacidade. Já a cementita é frágil e dura, apresentando dureza maior que 840 HV e é muito resistente ao cisalhamento. É basicamente um carboneto de Ferro. Por fim, a fase ferrita - solução sólida de Carbono em Ferro- α – é muito tenaz e mais maleável que as fases perlita e cementita.

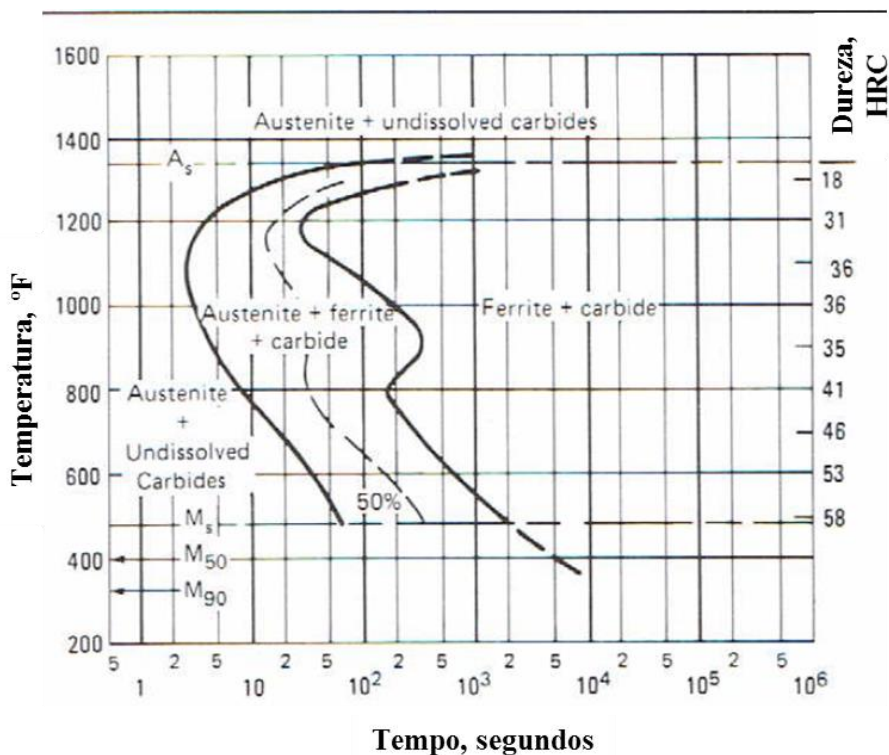
2.3.2 Curva CCT do aço SAE 52100

É importante salientar que este Trabalho de Diplomação não contempla dados históricos nem modela equações do aço SAE 52100 tratados termicamente, porém, fez-se necessário uma revisão da literatura neste assunto para esclarecer processos posteriores que esse aço necessita, bem apresentar alguns importantes diagramas.

A sequência dos processos recomendados para este aço é: forjamento, normalização, esferoidização, usinagem incluindo retificação, austenitização e têmpera, revenido acabamento de retificação (FLINT, 1995).

A Figura 2.18 mostra o Diagrama de Transformação Isotérmico (Isothermal Transformation Diagram) para um aço SAE 52100, com a seguinte composição química: 1,02 C, 0,36 Mn, 0,20 Ni e 1,41 Cr, austenitizado a 845 °C e com tamanho de grão 9, relacionado à dureza em HRC (FLINT et al., 1995).

Figura 2.18 Diagrama de Transformação Isotérmico. Composição química: 1,02 C, 0,36 Mn, 0,20 Ni e 1,41 Cr, austenitizado a 845 °C. Tamanho de grão 9.

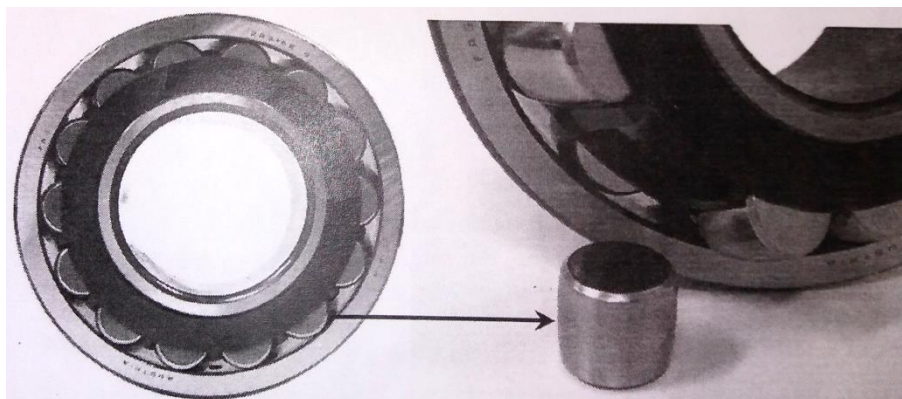


Fonte: FLINT et al., 1995.

Outro diagrama importante que deve ser apresentado é a Curva de Resfriamento Contínuo (CCC – Continuous Cooling Curves). A Figura 2.19 apresenta um típico diagrama destes para um aço SAE 52100, com composição química de: 1,06 C, 0,33 Mn, 0,32 Si, 1,44 Cr. Austenitizado a 845 °C e com tamanho de grão 9. A_{C3} 780 °C, A_{C1} 755 °C. Onde “A” é austenita, “F” é ferrita, “P” é perlita, “B” é bainita e “M” é martensita.

rolamento, o qual deve possuir uma resistência superficial ao desgaste superior (COOMAN et al., 2012).

Figura 2.20 Exemplo de rolamento para aplicações de esferas laminadas: a superfície dos rolamentos deve ter maior resistência superficial ao desgaste.



Fonte: COOMAN et al., 2012.

Quanto à temperabilidade, o alto teor de Carbono gera austenita retida, que por sua vez promove valores de M_f abaixo da temperatura ambiente. Para que a dureza seja mantida, a proporção de austenita retida deve ser, aproximadamente 5%. Sua presença gera efeitos positivos e negativos: forma martensita quando tensionada, criando tensões residuais com efeitos benéficos ou não. Essa martensita pode, por sua vez, gerar mudanças dimensionais no rolamento (COOMAN et al., 2012).

Conforme a norma AISI, é denominado E52100 e, conforme Norma DIN, é denominado DIN100Cr6. É um dos dois aços, basicamente, que possuem Carbono em torno de 1% ou mais. A dureza é um pouco mais elevada devido ao teor de Cromo ser um pouco maior do que se comparado ao aço E51100, embora possuam a mesma aplicação – aplicações mecânicas. A dureza pode variar de 62 a 66 HRC, dependendo da espessura da seção. Esses aços são selecionados quando se necessita de bons tamanhos de seções e de um aumento na temperabilidade (FLINT et al., 1995).

Algumas propriedades mecânicas relacionadas à tração, conforme a microestrutura de um aço com 1% de Carbono, estão resumidas na Tabela 2.5 (CHIAVERINI, 2005).

Tabela 2.5 Efeito do tipo de estrutura sobre as propriedades de tração do aço.

Propriedade	Ferro comercialmente puro	Aço com 1% de Carbono		
		Perlítico	Coalescido	Temperado e Revenido
Limite de escoamento, kgf/mm² (MPa)	18,2 (182)	59,5 (585)	28,0 (280)	-
Limite de Resistência à Tração, kgf/mm² (MPa)	29,4 (284)	105,0 (1030)	54,6 (536)	182,0 (1785)
Alongamento, %	40-44	10	31	33
Estricção, %	70-75	12-15	57	45
Dureza Brinell	80-85	300	156	540

Fonte: CHIAVERINI, 2005.

O objetivo da Tabela 2.5 é mostrar que pequenas seções de aço carbono, ao serem submetidas a tratamentos térmicos, podem produzir excelentes propriedades à temperatura ambiente. A presença de Carbono já é suficiente para fornecer, como por exemplo, num aço laminado, maior resistência, entretanto, com certo prejuízo da ductilidade, que pode ser melhorada após realizada certa esferoidização (coluna 3) (CHIAVERINI, 2005).

Pode-se dizer que, em geral, a resistência à tração dos aços carbono aumenta com o teor de Carbono até 0,7% e 0,8%. Já o limite de escoamento tem uma elevação menos acentuada e é até 0,6% e 0,7% de Carbono. O alongamento e resistência ao choque decrescem de modo acentuado. As propriedades mecânicas estão sempre ligadas aos vários constituintes estruturais (CHIAVERINI, 2005).

É importante salientar que este presente trabalho é relacionado a um produto sem tratamento térmico, porém, usualmente em aços para rolamento realizam-se tratamentos térmicos (conforme comentado no subcapítulo 2.3) que irão modificar a microestrutura e as propriedades mecânicas, ficando mais tenaz e resistente ao desgaste. Haverá formação de martensita e bainita, conforme taxas de resfriamento utilizadas.

2.5 Carbono Equivalente

Existem inúmeras fórmulas de carbono equivalente para os aços. O objetivo deste cálculo é mensurar os efeitos dos elementos de liga, juntamente com os do Carbono, na temperabilidade do aço, isto é, na capacidade de endurecimento do aço (PICKERING, 1983).

Por meio do cálculo do carbono equivalente, é possível prever diversas propriedades mecânicas e microestruturais dos aços. A propósito, seu uso é comumente utilizado na área da soldagem para prevenir fragilização por Hidrogênio na zona afetada pelo calor (ZAC) da solda (TALAS, 2009).

A dureza de um aço é, basicamente, variável conforme sua composição química e microestrutura (CHIAVERINI, 1996). Tendo isso em vista, pode-se falar em variáveis que afetam essas duas, como por exemplo, taxa de resfriamento do material, efeitos específicos que cada um dos elementos de liga, etc.

2.5.1 Fórmulas existentes e seus empregos

Embora boa parte dos estudos tenha sido direcionada para aplicação de fórmulas de carbono equivalente para estimar propriedades dos metais de solda, o conceito se estende de forma semelhante aos metais com base em aço.

O grau de relação entre o carbono equivalente e as propriedades microestruturais e mecânicas muda conforme a fórmula de carbono equivalente utilizada e o que se pretende prever. Isto é, há fórmulas mais adequadas para se prever a dureza, por exemplo, do que outra propriedade. Além disso, há também uma fórmula de carbono equivalente mais adequada para cada faixa de composição química do metal (TALAS, 2009).

Fórmulas de carbono equivalente são sensíveis a fatores químicos, ou seja, não são sensíveis a tamanho de grão e métodos de processamento. Porém, alguns pesquisadores propõem formulações que incluam essas variáveis, bem como a espessura da chapa e taxa de resfriamento do metal de solda, em faixas específicas de temperaturas, para estimar as transformações e a dureza da ZAC, com alta precisão, baseando-se em dados experimentais (TALAS, 2009).

É importante salientar que, neste trabalho, a microestrutura é estável e conhecida, para qualquer uma das bitolas. Portanto, não há interesse em estimá-la pelo uso de fórmulas de carbono equivalente.

Há inúmeras fórmulas de carbono equivalente na literatura. Algumas delas podem ser verificadas na Tabela 2.6, a qual lista algumas fórmulas e seus respectivos autores, com valores dos elementos químicos representado em % em massa. Além da fórmula do carbono equivalente proposta pelo International Institute of Welding (IIW), a fórmula proposta pela American Welding Society (AWS) D1.1, a de Ito-Bessyo (PCM), a de CET e de Yurioka (CEN) também são usadas comumente para prever a dureza, especificamente, na zona afetada pelo calor (TALAS, 2009).

Tabela 2.6 Fórmulas de carbono equivalente, com valores dos elementos químicos representado em % em massa.

Título do CE	Fórmula	Equações
CE^A_{IW}	$C + (Mn/6) + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$	Eq. (1)
AWS D1.1^A	$C + (Mn + Si)/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$	Eq. (2)
CE^A_{WES136}	$C + (Mn/6) + (Si/24) + (Mo/29) + (V/14)$	Eq. (3)
Pcm (Ito–Bessyo)^B	$C + (Si/30) + (Mn + Cu + Cr)/20 + (Ni/60) + (Mo/15) + (V/10) + 5B$	Eq. (4)
Graville^A	$C + (Mn/16) + (Ni/50) + (Cr/23) + (Mo/7) + (Nb/5) + (V/9)$	Eq. (5)
Yurioka (CEN)^D	$C + f(C)\{Si/24 + Mn/6 + Cu/15 + Ni/20 + (Cr + Mo + Nb + V)/5 + 5B\}$ $f(C) = 0.75 + 0.25 \tanh \{20(C - 0.12)\}$	Eq. (6)
CE_{WES} (Kihara)^A	$C + (Mn/6) + (Si/24) + (Ni/40) + (Cr/5) + (Mo/4) + (V/14)$	Eq. (7)
Stout and Doty^A	$C + (Mn/6) + (Ni/20) + (Cr + Mo)/10 + (Cu/40)$	Eq. (8)
Dearden–O’Neill^A	$C + (Mn/6) + (Mo/4) + (Ni/15) + (Cr/5)$	Eq. (9)
Koch–Bersch^C	$C + (Mn + Mo + Ni + Cr + V + Cu + Si)/20$	Eq. (10)
Duren (C_{PLS})^C	$C + (Mn + Cu)/16 + (Si/25) + (Cr/20) + (Ni/60) + (Mo/40) + (V/15)$	Eq. (11)
Winterton^A	$C + (Mn/6) + (Cu/40) + (Ni/20) + (Cr - V)/10 + (Mo/50)$	Eq. (12)
BreadStreet^A	$C + (Mn/20) + (Ni/15) + (Cr + Mo + V)/10$	Eq. (13)
Cottrell^A	$C + (Mn/6) + (Cr + Mo)/5 + (V/3) + (Nb/4C) + (0.0001/S)$	Eq. (14)
CET^B	$C + (Mn + Mo)/10 + (Cu + Cr)/20 + (Ni/40)$	Eq. (15)
AWS^A	$C + (Mn/4) + (Ni/20) + (Cr + V)/10 + (Cu/40) + (Mo/50)$	Eq. (16)
C^C_{HSLA}	$C + (Mn/16) + (Cr/23) + (Mo/7) + (Nb/5) + (V/9) + (Ni/50)$	Eq. (17)
CE_{WM}^a	$C + (Mn + Cr + V + Si)/6 + (Mo/4) + (Nb/9) + (Ti/3) + (Cu/20) + (Ni/25) + 5B$	Eq. (18)

^a Proposta por TALAS, 2009.

Fonte: Adaptado de TALAS, 2009.

Tomando-se uma classificação das fórmulas de carbono equivalente conforme faixas de composição química do aço, tem-se 3 grupos: GRUPO A, que compõe as fórmulas de carbono equivalente quando a composição química do aço possui teores mais elevados de Carbono e Manganês. O GRUPO D, que engloba a fórmula que pode ser usada para qualquer tipo de aço. O GRUPO B, que engloba as fórmulas cujos teores de Carbono são, relativamente, menores. E, por fim, o GRUPO C, que compõe aços de oleodutos (TALAS, 2009).

Para o presente Trabalho de Diplomação, foram selecionadas algumas fórmulas de carbono equivalente do GRUPO A – já que teor de Carbono é mais próximo do teor de Carbono da qualidade de aço estudada, a SAE 52100. Entre elas, foram verificadas quais fórmulas seriam mais relevantes para a representação da dureza.

A relação entre carbono equivalente e a propriedade mecânica e a microestrutura que se deseja estimar pode ser verificada na Tabela 2.7, a qual ilustra a intensidade da relação em forma de um número. Esse número é um comparativo dos coeficientes de correlação R^2 para carbono equivalente e as propriedades do metal de solda. Isso foi possível através de uma análise estatística com um banco de dados históricos (TALAS, 2009).

Tabela 2.7 Comparativo dos coeficientes de correlação R² para carbono equivalente e as propriedades do metal de solda.

	IIW	AWSD1.1	CE _{WES136}	Pcm	Graville	CEN	Kihara	Stout	Dearden
AF	0.224	0.236	0.462	0.276	0.269	0.222	0.222	0.325	0.206
FSP	0.030	0.021	-0.302	-0.030	-0.041	0.022	0.040	0.093	0.050
GBF	-0.533	-0.544	-0.378	-0.521	-0.491	-0.503	-0.521	-0.515	-0.531
$\Sigma W*mi$	1.513	1.529	2.658	1.605	1.574	1.430	1.521	1.909	1.537
YS	0.823	0.839	0.538	0.758	0.756	0.778	0.810	0.773	0.819
UTS	0.857	0.876	0.598	0.829	0.822	0.842	0.842	0.822	0.851
EL%	-0.650	-0.661	-0.510	-0.628	-0.636	-0.628	-0.667	-0.633	-0.651
HRD	0.794	0.827	0.631	0.770	0.739	0.757	0.783	0.798	0.796
CVT	0.226	0.247	-0.100	0.087	0.071	0.122	0.244	0.113	0.242
$\Sigma W*me$	4.370	4.520	3.018	3.828	3.750	3.946	4.397	3.948	4.405
$\Sigma W*All$	5.884	6.048	5.675	5.435	5.323	5.376	5.919	5.858	5.941
	Koch Bersch	Duren	Winterton	BreadStreat	Cottrell	AWS	CET	HSLA	CE_{WM}
AF	0.198	0.283	0.304	0.072	0.146	0.375	0.355	0.249	0.296
FSP	0.004	0.071	0.088	0.142	0.100	0.163	0.130	0.056	0.022
GBF	-0.470	-0.461	-0.482	-0.473	-0.450	-0.480	-0.503	-0.350	-0.573
$\Sigma W*mi$	1.261	1.651	1.789	1.451	1.432	2.187	2.075	1.334	1.712
YS	0.717	0.713	0.737	0.754	0.823	0.718	0.739	0.556	0.845
UTS	0.787	0.789	0.787	0.797	0.844	0.764	0.805	0.612	0.883
EL%	-0.526	-0.576	-0.602	-0.551	-0.728	-0.608	-0.611	-0.533	-0.699
HRD	0.721	0.712	0.769	0.712	0.729	0.766	0.759	0.524	0.860
CVT	0.083	0.041	0.105	0.214	0.371	0.065	0.035	0.030	0.240
$\Sigma W*me$	3.524	3.467	3.768	3.957	4.777	3.616	3.602	2.773	4.607
$\Sigma W*All$	4.787	5.117	5.558	5.407	6.211	5.808	5.680	4.109	6.319

Fonte: Adaptado de TALAS, 2009.

O termo “ $\sum W$ ” são os valores ponderados, o “ $\sum W*mi$ ” é o subtotal ponderado para conteúdo microestrutural, “ $\sum W*me$ ” é o subtotal para propriedades mecânicas e, finalmente, o “ $\sum W*All$ ” é o total dos valores ponderados para todas as propriedades. As fórmulas de carbono equivalente tratadas neste trabalho são com valores dos elementos químicos representados em % em massa.

Como pode ser visualizado na Tabela 2.7, as três fórmulas de carbono equivalente com maiores valores para dureza (HRD), que significa melhor representatividade da dureza, são: CE_{WM} , (TALAS, 2009), AWS D1.1 e Stout and Doty. São elas:

$$CE_{WM} = C + \frac{Mn+Cr+V+Si}{6} + \frac{Mo}{4} + \frac{Nb}{9} + \frac{Ti}{3} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{25} + 5B, \text{ Equação (2.1)}$$

$$AWS D1.1 = C + \frac{Mn+Si}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15}, \text{ Equação (2.2)}$$

$$\text{Stout and Doty} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr+Mo}{10} + \frac{Cu}{40}, \text{ Equação (2.3)}$$

Alguns outros valores de fórmulas de carbono equivalente referentes à dureza, destacados apenas em negrito, também serão discutidos ao longo deste capítulo.

A CE_{IIW} é outra fórmula de carbono equivalente comumente utilizada para estimar a dureza e, então, estimar outras propriedades mecânicas de metais na soldagem (KIM et al., 2016).

O uso da fórmula CE_{IIW} está coerente com o estudo realizado por TALAS, a qual ocupa a quinta posição na pontuação relacionada com a representatividade da dureza na Tabela 2.2. Portanto, também será uma das fórmulas utilizadas neste Trabalho de Diplomação.

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15}, \text{ Equação (2.4)}$$

As fórmulas de Dearden–O’Neill, Pcm (Ito–Bessyo) e CE_{WES} (Kihara) também são utilizadas internacionalmente para prever a dureza, conforme pode ser verificado em estudos realizados (YURIOKA et al., 1990).

Porém, a quinta fórmula escolhida para este trabalho é Dearden–O’Neill, já que sua colocação na Tabela 2.2 é a quarta (quarto maior valor). Por isso, há preferência em seu uso em relação às fórmulas de Pcm (Ito–Bessyo) e Kihara.

$$\text{Dearden} - \text{O'Neill} = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Mo}}{4} + \frac{\text{Ni}}{15} + \frac{\text{Cr}}{5}, \text{Equação (2.5)}$$

Por outro lado, um estudo realizado com chapas de aço dos materiais HSLA (Advanced High Strength Steels), DP600 (Dual Phase), DP780, DP980 and TRIP780 (Transformation induced Plasticity) foram soldadas com solda a laser, efetuando-se combinações entre chapas distintas e iguais, com o objetivo de comparar a microestrutura, dureza e resistência à tração da zona afetada pelo calor (ZAC), utiliza a fórmula de carbono equivalente de Yurioka (CEN) (ESQUIVEL et al., 2011):

$$\text{Yurioka (CEN)} = C + f(C) \left\{ \frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Cu}}{15} + \frac{\text{Ni}}{20} + \frac{\text{Cr} + \text{Mo} + \text{Nb} + \text{V}}{5} + 5B \right\}, \text{Equação (2.6)}$$

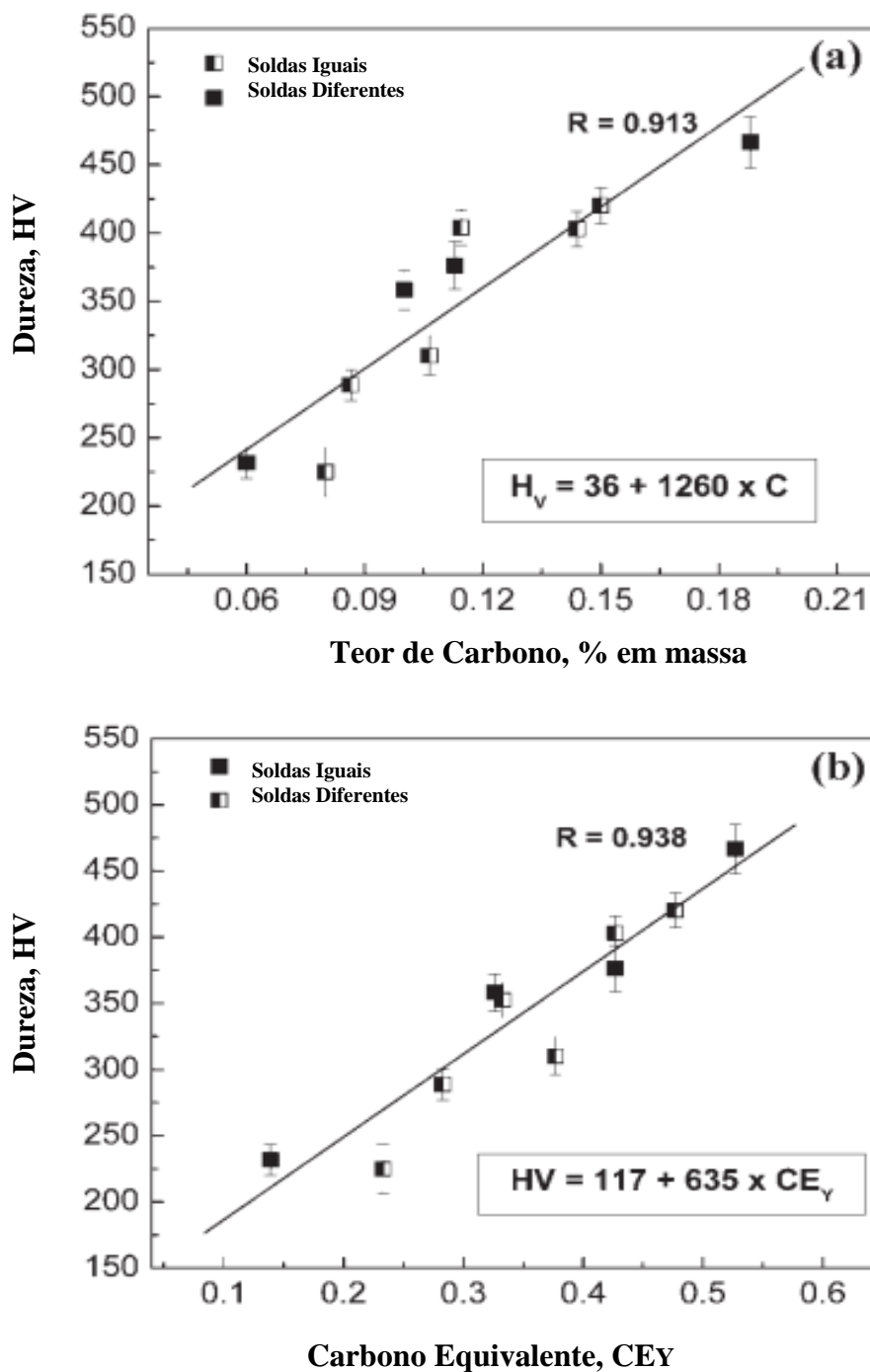
$$\text{Sendo } f(C) = 0.75 + 0.25 \tanh\{20(C - 0.12)\}, \text{Equação (2.7)}.$$

Segundo a literatura, a fórmula de carbono equivalente de Yurioka (CEN) pode ser utilizada em uma ampla gama de aços, embora tenha sido desenvolvida, inicialmente, para aços microligados e aços ao Carbono e Manganês. Sendo assim, considerando a classificação em grupos de uso conforme teor de Carbono, essa fórmula pertence ao “GRUPO D” (TALAS, 2009).

No estudo de Esquivel et al., 2011, a fórmula de Yurioka (CEN) é utilizada tanto para chapas de 0,063% C – chapa HSLA – quanto para chapas de 0,188% C – chapa TRIP780 - ampla faixa de teor de Carbono. No caso de soldas entre chapas distintas, foi realizada uma média do teor de Carbono para, então, calcular o carbono equivalente. Mais detalhes sobre o assunto podem ser verificados acessando o artigo.

A fórmula do carbono equivalente de Yurioka (CEN, ou CE_Y) é considerada um meio eficaz para se prever os efeitos que os elementos de liga causam na temperabilidade do aço, isto é, na sua dureza. A Figura 2.21 mostra duas relações: (a) a variação da dureza da zona afetada pelo calor (ZAC) em função do teor de carbono na liga de aço e (b) a variação da dureza da zona afetada pelo calor (ZAC) em função do carbono equivalente utilizando a fórmula de Yurioka (CE_Y) (ESQUIVEL et al., 2011).

Figura 2.21 Variação da dureza da zona afetada pelo calor (a) com o teor de Carbono e (b) com o carbono equivalente em soldagem a laser com combinação tanto semelhante quanto diferentes: fórmulas de regressão obtidas utilizando ajuste linear de dados experimentais estão também inclusas.



Fonte: ESQUIVEL et al., 2011.

Como pode ser visualizado na Figura 2.21, a relação da dureza da zona afetada pelo calor está mais fortemente relacionada linearmente com valores de carbono equivalente de Yurioka (CE_Y) do que com o teor de Carbono, já que o coeficiente de regressão é de 0,938

e 0,913, respectivamente. Em outras palavras, a fórmula de carbono equivalente representa muito melhor os efeitos nas propriedades dos aços do que simplesmente o teor de carbono e dos elementos de forma isolada (ESQUIVEL et al., 2011).

Em um outro estudo cujo objetivo é desenvolver equações que modelem a região da zona afetada pelo calor - já que essa é uma região que apresenta um perfil de durezas devido a uma variação da microestrutura - também utiliza a fórmula de carbono equivalente de Yurioka (CEN) como base para desenvolver tais equações. É desenvolvido um modelo que leva em consideração o tamanho de grão austenítico, uma vez que as fórmulas de carbono equivalente de modo geral não incluem essa variável, juntamente com a taxa de resfriamento do aço. Os valores de dureza teórico gerados por esse modelo, chegam bem próximos a valores reais de dureza vickers (KASUYA, T.; HASHIBA, Y., 2007).

Há um estudo que buscou determinar experimentalmente a temperatura de pré-aquecimento necessária para prevenir fragilização por Hidrogênio contida em soldas de topo. Foram, também, determinados os melhores algoritmos para representar essa temperatura mínima e, para isso, necessitou-se estabelecer limites de carbono equivalente a fim de reduzir essa temperatura das classes B, D e DH-36 de aços de construção naval. A fórmula de carbono equivalente utilizada no estudo foi a Pcm (Ito-Bessyo), uma das primeiras desenvolvidas na literatura, juntamente, com as CE_{IIW} e Yurioka (CEN) (DEVLETIAN, 2000).

Pcm (Ito-Bessyo) foi desenvolvida para uma aplicação em aços modernos, de baixa liga e baixo Carbono (GLADMAN, 1997). Nota-se que o Carbono tem um peso bem considerável na equação e, por isso, é bom para indicar seus efeitos na zona afetada pelo calor. Esses efeitos são críticos devido à alta formação de martensita nessa região, logo, Pcm (Ito-Bessyo) é bem útil para esses casos (DEVLETIAN, 2000).

$$Pcm = C + \frac{Si}{30} + \left(\frac{Mn+Cu+Cr}{20} \right) + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B, \text{ Equação (2.8)}$$

Já a fórmula CE_{IIW} , Equação (2.4), leva em consideração bem mais os efeitos dos outros elementos químicos que não o Carbono, se comparado a fórmula Pcm (Ito-Bessyo), conforme pode ser verificado nos denominadores. Ela é mais utilizada para aços comuns (DEVLETIAN, 2000) e (GLADMAN, 1997).

Note que a fórmula de Yurioka (CEN), Equação (2.6), se aproxima da fórmula de CE_{IIW} para aços com teor de Carbono mais elevado (o arco tende a 20 e a tangente

hiperbólica tende a 1). Já para aços com teor de Carbono menores, a fórmula de Yurioka (CEN) se aproxima da fórmula de PCM (DEVLETIAN, 2000).

A fórmula Pcm (Ito–Bessyo) não será utilizada neste Trabalho de Diplomação, uma vez que o teor de Carbono do aço SAE 52100 é, relativamente, alto. Porém, a fórmula de carbono equivalente de Yurioka (CEN) será a sexta fórmula escolhida para ser utilizada no presente trabalho.

Outras duas fórmulas de carbono equivalente frequentemente utilizadas, para aços baixa liga e alta resistência, segundo PICKERING et. al. (1983), são:

$$CE1 = C + \frac{Mn}{16} + \frac{Si}{43} + \left(\frac{Ni+Cr}{15}\right) + \left(\frac{Cr+Mo}{10}\right), \text{Equação (2.9)}$$

$$CE2 = C + \frac{Mn}{16} + \frac{Si}{43} + \left(\frac{Ni+Cr}{28}\right) + \frac{Mo}{22}, \text{Equação (2.10)}$$

Porém, as Equações (2.9) e (2.10) não serão utilizadas neste Trabalho de Diplomação.

Um objetivo de um certo estudo era entender melhor o significado do carbono equivalente, clareando a relação entre ele e o fator de Crossmann. O carbono equivalente está relacionado ao tempo de resfriamento crítico para que toda a estrutura martensítica se forme na zona afetada pelo calor, enquanto que o fator multiplicador, que é utilizado no tratamento térmico de aços endurecidos, está relacionado com o diâmetro crítico para que se forme toda a martensita. Ambos fatores (tanto o carbono equivalente, quanto o fator multiplicador) estão relacionados a capacidade de endurecimento dos aços. A condução de calor numa barra redonda indica que o diâmetro ideal crítico deveria ser expresso sob forma de produto de elementos de liga, enquanto que o carbono equivalente está expresso em forma de uma combinação linear dos elementos. (KASUYA, T.; YURIOKA, N., 1991).

Embora o fator de Crossmann esteja relatado no tratamento térmico, ele também descreve a temperabilidade dos aços, assim como as fórmulas de carbono equivalente. A diferença está na expressão matemática: o carbono equivalente é uma combinação linear e o fator de Crossmann é uma combinação de multiplicação. Crossmann apresenta o conceito de expressar a temperabilidade dos aços tratáveis termicamente em termos de um fator de multiplicação, de acordo com o efeito da composição do aço na temperabilidade, que é dado sob forma de produto (KASUYA, T.; YURIOKA, N., 1991).

Como base para cálculos e comparações de resultados duas fórmulas de carbono equivalente, já mencionadas neste Trabalho de Diplomação: são utilizadas no estudo de KASUYA, T.; YURIOKA, N., 1991: a de Dearden-O'Neill e a de CE_{IIW} , conforme Equações (2.4) e (2.5).

A ideia de introduzir o estudo de KASUYA, T.; YURIOKA, N., 1991, é para se ter ideia de que quando há tratamento térmico envolvido no endurecimento de aços, há uma maior complexidade de se expressar fórmulas que avaliem a temperabilidade dos aços. Os autores propõem uma relação na qual os coeficientes de cada elemento químico do carbono equivalente possam ser calculados a partir do fator multiplicador. Para maiores detalhes, acesse o artigo.

Como este Trabalho de Diplomação foi direcionado para um produto sem tratamento térmico, para o qual a microestrutura é estável, não serão comentados fórmulas e métodos para estimar a dureza numa certa região da amostra em que a microestrutura seja variada.

A Tabela 2.8 sinaliza um resumo das fórmulas de carbono equivalente utilizadas neste Trabalho de Diplomação, bem como a numeração que representa cada uma delas. Essa numeração também será usada para a identificação do Modelo Teórico que será gerado.

Tabela 2.8 Resumo das fórmulas de carbono equivalente, com valores dos elementos químicos em % em massa, utilizadas neste Trabalho de Diplomação, com a respectiva numeração do Modelo que irá representar.

Título do Carbono Equivalente	Fórmula do Carbono Equivalente	Numeração do Carbono Equivalente
CE_{WM}	$C + (Mn + Cr + V + Si)/6 + (Mo/4) + (Nb/9) + (Ti/3) + (Cu/20) + (Ni/25) + 5B$	1
AWS D1.1	$C + (Mn + Si)/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$	2
Stout and Doty	$C + (Mn/6) + (Ni/20) + (Cr + Mo)/10 + (Cu/40)$	3
CE_{AIIW}	$C + (Mn/6) + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$	4
Dearden-O'Neill	$C + (Mn/6) + (Mo/4) + (Ni/15) + (Cr/5)$	5
Yurioka (CEN)	$C + f(C)\{Si/24 + Mn/6 + Cu/15 + Ni/20 + (Cr + Mo + Nb + V)/5 + 5B\}$ $f(C) = 0.75 + 0.25 \tanh \{20(C - 0.12)\}$	6

Devido a uma linearidade entre a dureza e o carbono equivalente, já conhecida na literatura, a relação pode ser expressa por (ESQUIVEL et al., 2011):

$$HB_x = F_x \cdot Ceq_x, \text{ Equação (2.11).}$$

Onde:

HB_x é o valor de dureza Brinell para o Modelo ‘x’, podendo ser HB₁, HB₂, HB₃, HB₄, HB₅, HB₆.

F_x é o fator que leva em consideração os valores de dados históricos de dureza Brinell e de composição química (carbono equivalente), podendo ser F₁, F₂, F₃, F₄, F₅, F₆. Calculado este valor, passará a ser um fator fixo a partir da validação dos métodos.

Ceq_x é a fórmula do carbono equivalente que está sendo utilizada, podendo ser Ceq₁, Ceq₂, Ceq₃, Ceq₄, Ceq₅, Ceq₆, variando conforme a composição química da corrida em questão.

Sendo assim, tem-se:

$$F_1 = \frac{\frac{\sum HB}{\text{quantidade de dados}}}{\frac{\sum Ceq_1}{\text{quantidade de dados}}}, \text{ Equação (2.12)}$$

Resultando em:

$$HB1 = F1 \cdot Ceq1, \text{ Equação (2.13).}$$

A relação da Equação (2.11) também é utilizada para estimar a dureza Brinell no Trabalho de Diplomação de SILVA da, 2006.

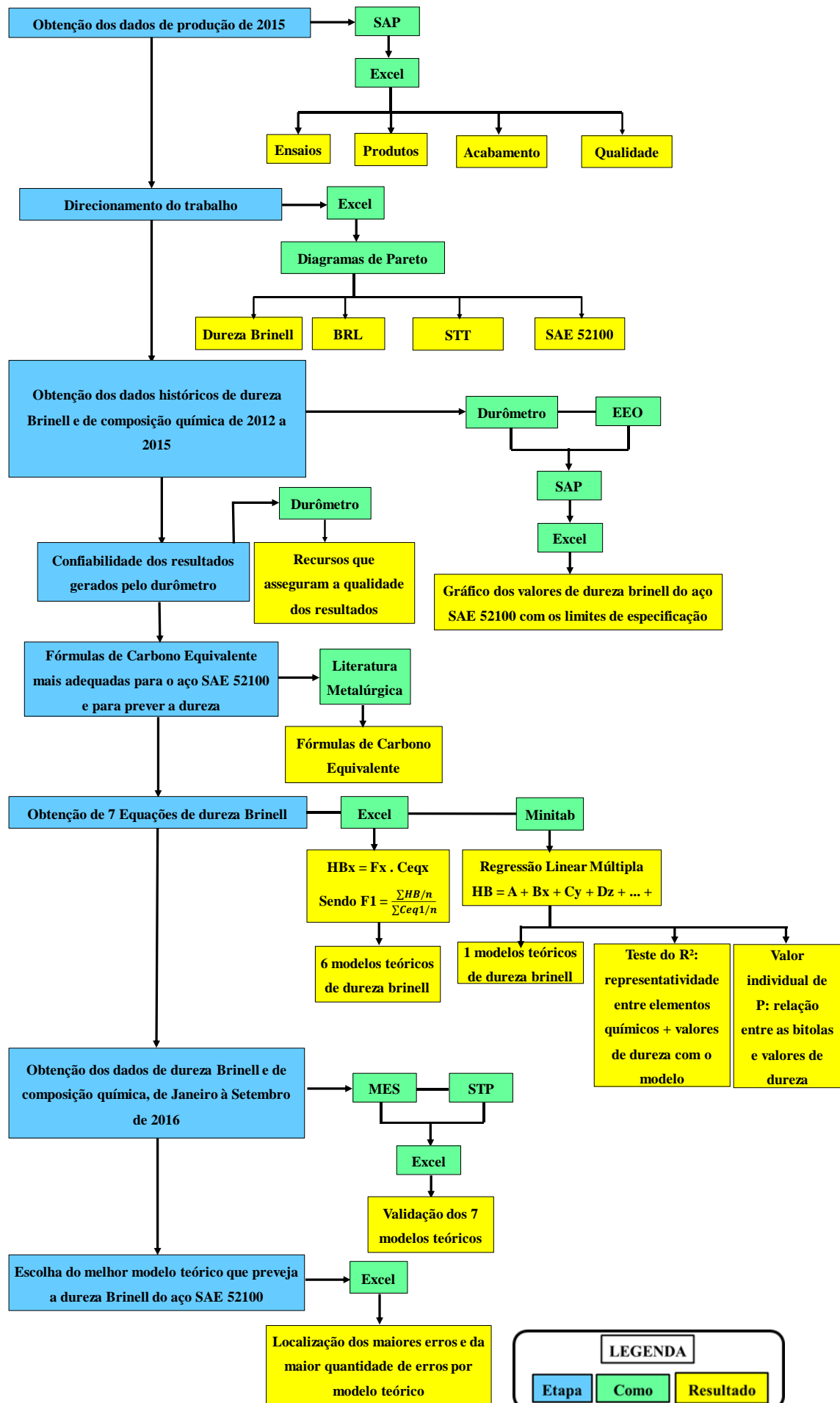
3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Metodologia

A metodologia deste Trabalho de Diplomação envolveu 8 etapas e foram seguidas numa ordem cronológica, isto é, a etapa seguinte só se iniciava após o término da anterior. Para cada etapa, foram utilizados recursos diferentes e, então, um resultado particular foi gerado. O fluxograma resumido de toda metodologia pode ser verificado na Figura 3.1, na página seguinte, o qual ilustra a ordem seguida das etapas realizadas, como foram realizadas e quais resultados prévios foram sendo obtidos. Há uma legenda na figura que explica o que é cada cor do fluxograma.

A idéia deste subcapítulo é descrever como exatamente foram realizadas cada uma das etapas, bem como os resultados que foram sendo obtidos para ser possível passar para a etapa seguinte. Também haverá uma breve descrição de quanto tempo foi necessário para as etapas, pois esse dado é importante para trabalhos futuros que pretendam seguir uma metodologia parecida.

Figura 3.1 Fluxograma (página seguinte) da metodologia seguida no estudo, com legenda que explica quais informações são etapas, quais representam a maneira que foram realizadas e quais foram os resultados obtidos.



3.1.1 Obtenção dos dados de produção de 2015

A primeira etapa da metodologia foi obter os dados de produção de toda a Usina de 2015, de tudo que foi produzido que contivesse ensaio realizado no Laboratório Metalúrgico. O objetivo desta etapa foi iniciar o direcionamento do trabalho, para que pudesse ser visualizado, mais à frente, onde deveria se atuar primeiro, isto é, onde o o ganho fosse o maior quanto a produtividade, porém, respeitando as particularidades da empresa. Para tal, foi necessário utilizar o software SAP, o qual resgatou esses dados de diferentes janelas, já que a quantidade de informações era imensa. Foi necessário a movimentação de mais de uma pessoa na Usina que entendesse a fundo os detalhes de como obter esses dados, com cada um dos filtros adequados. Isso levou, aproximadamente, uma semana.

Os dados obtidos do software SAP formaram diversos arquivos no formato Excel e se apresentavam de forma extremamente desordenada e sem sentido algum para a análise que deveria ser feita. Cada informação contida numa linha, de um arquivo, deveria se encontrar com as respectivas informações das linhas de outro arquivo. Para ordenar de maneira correta esses dados, utilizou-se o software Excel, utilizando os comandos adequados. Este período foi extenso e penoso, devido ao fato dos comandos no Excel serem manuais, levando aproximadamente 1 mês e 1 semana para concluí-lo.

Conseguiu-se obter informações da quantidade de ordem de produção (OP) para as mais diversas características do aço, como por exemplo, qualidade de aço, acabamento, tipo de produto, ensaios realizados, etc. Para se entender um pouco melhor o conceito de ordem de produção: uma corrida de aço produzido na Usina pode gerar inúmeras ordens de produção, que pode se destinar à diversos clientes. Para cada ordem de produção, há informações no sistema sobre quais os ensaios, bem como a quantidade dos mesmos. Em outras palavras, a quantidade de ensaios é muito maior que a quantidade de ordens de produção geradas. A quantidade de ordens de produção relacionada a cada tipo de produto e a cada tipo de acabamento, bem como a cada tipo de ensaio representa a quantidade real do de cada característica.

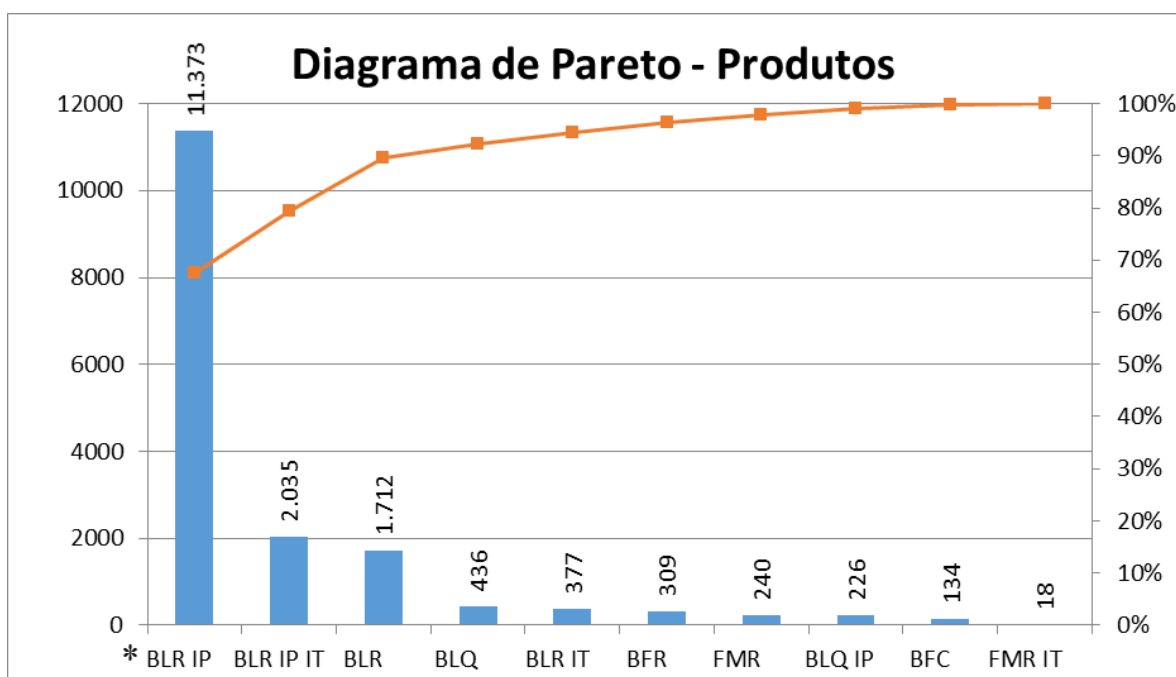
Foi possível obter o direcionamento do trabalho, que está decrito no subcapítulo seguinte.

3.1.2 Direcionamento do trabalho e estimativa de ganho em tempo por ensaio

Através de tabelas dinâmicas no Excel aplicadas aos dados organizados, foi possível obter Diagramas de Pareto, os quais indicaram onde seria mais adequado atuar de forma visual. Os Diagramas de Pareto indicam a quantidade de uma certa característica e sua representação em percentual, bem como a quantidade em percentual acumulada de todas as características. As características ficam dispostas de forma decrescente, da mais representativa até a menos representativa. Essa etapa despendeu 1 ou 2 dias.

A Figura 3.2 ilustra o primeiro Diagrama de Pareto obtido, que demonstra a quantidade de ordem de produção para cada tipo de Produto produzido no período de 2015.

Figura 3.2 Diagrama de Pareto: quantidade de ordens de produção por tipo de produto produzido no período de 2015.

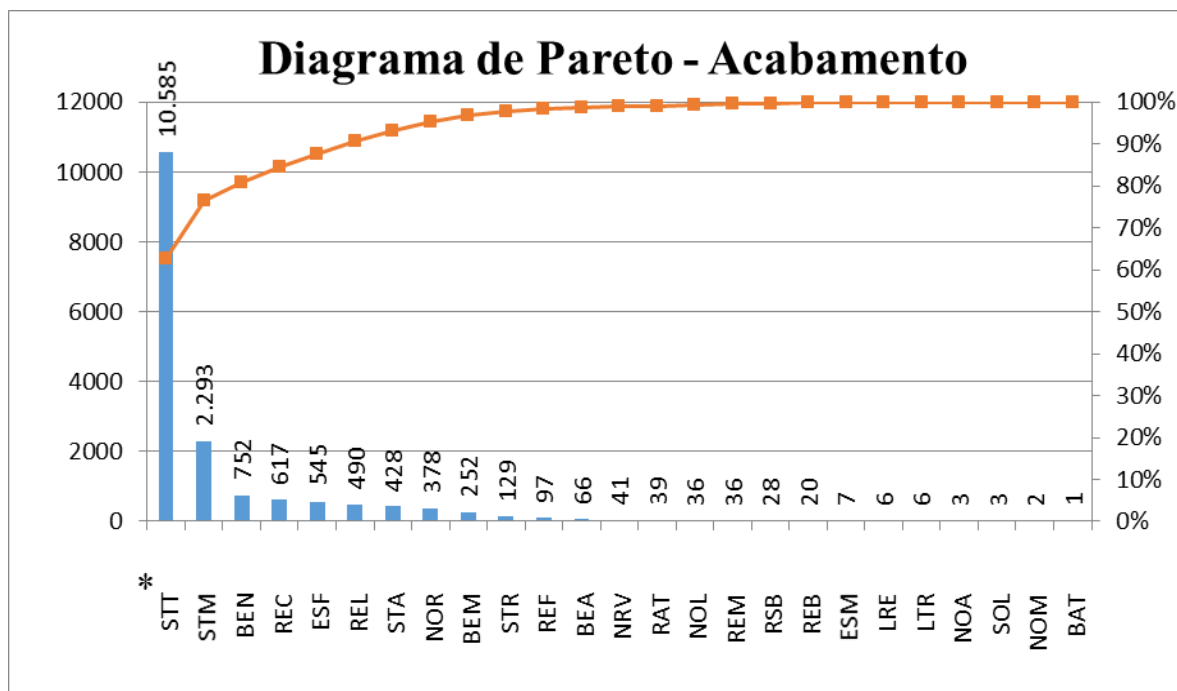


* Verificar os significados das abreviações na Lista de Abreviações deste Trabalho.

Como pode ser verificado, a maior produção se concentra, altamente, em produtos de barra laminadas redondas inspecionadas (BLR IP), representando, aproximadamente, 70%. Considerando todos os produtos barra laminada redonda, seja BLR, BLR IP, BLR IP IT, tem-se mais de 90% de toda a produção. Logo, o primeiro direcionamento será apontando para este tipo de produto.

O segundo Diagrama de Pareto obtido foi referente à quantidade de ordens de produção relacionadas ao tipo de acabamento do aço. A Figura 3.3 representa esse diagrama.

Figura 3.3 Diagrama de Pareto: quantidade de ordens de produção por tipo de acabamento no aço produzido no período de 2015.



* Verificar os significados das abreviações na Lista de Abreviações deste Trabalho.

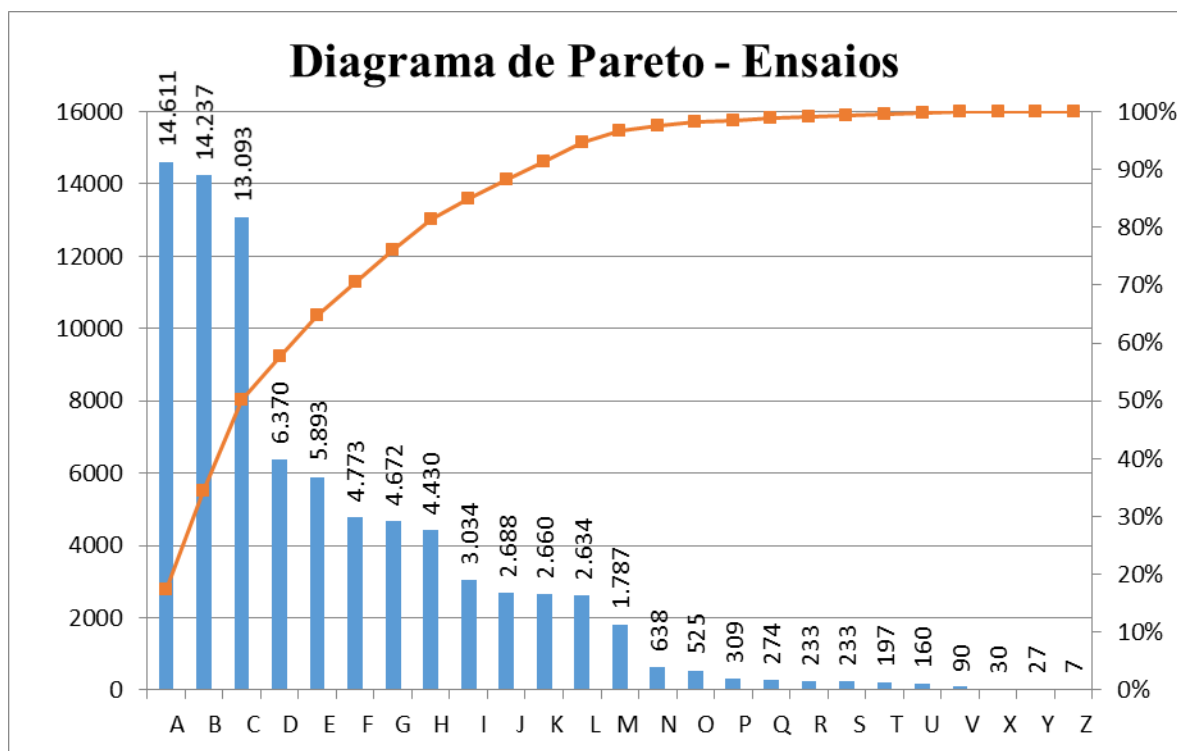
Como pode ser visto na Figura 3.3, produtos sem tratamento térmico (STT) se destacam em relação aos demais acabamentos, representando 60% da quantidade total de todos os acabamentos produzidos. Tendo isso em vista, o segundo direcionamento deste trabalho foi definido, então, para barra laminadas sem tratamento térmico.

O terceiro Diagrama de Pareto realizado foi o dos ensaios realizados no Laboratório Metalúrgico em 2015, isto é, da quantidade de ordens de produção relativa a cada um dos ensaios. A Figura 3.4 ilustra esse diagrama. Por questões de visualização na figura, considerando seu tamanho padrão, não foi possível deixar à vista os ensaios no eixo x do gráfico na Figura 3.4. Devido a isso, foi criada uma tabela para indicar qual ensaio está representado por qual letra. Isso pode ser verificado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Ensaio correspondente a cada letra que o representa no eixo x do gráfico da Figura 3.4.

Relação entre a letra e o ensaio no gráfico da Figura 3.4			
A	Dureza HB	N	Dureza HR
B	TG Austenítico	O	K3
C	Inclusão	P	TG Ferrítico
D	Segregação Química	Q	Rede de carbonetos
E	Fratura Azul	R	Fragilização
F	Descarbonetação	S	Inderterminado
G	Macrografia	T	Dureza HV
H	O2 Total	U	Microestrutura
I	K4	V	Temperabilidade
J	Tração	X	Fração de Perlita
K	Di Pol	Y	K2
L	Impacto	Z	Microinclusões
M	Grau de Esferoidização		

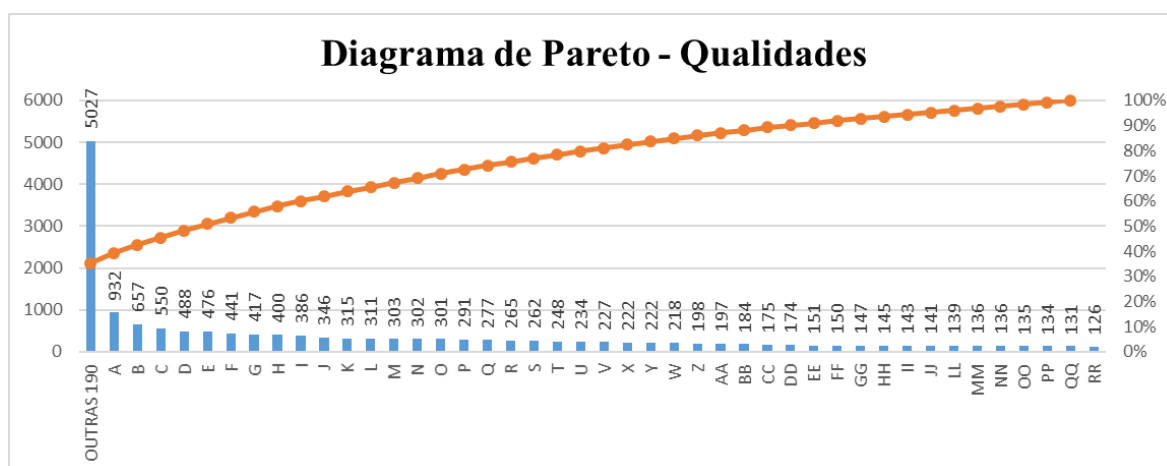
Figura 3.4 Diagrama de Pareto: quantidade de ordens de produção por tipo de ensaio realizado no período de 2015.



Nota-se que há um grande destaque para as quantidades dos ensaios de dureza Brinell, tamanho de grão austenítico e inclusões, representando, cada um, aproximadamente 17% e, somados, 50%. Porém, após realizada uma avaliação quanto aos ensaios que poderiam ser estimados por meio de cálculos, notou-se que não era válido despendar energia nos ensaios de tamanho de grão austenítico, ou no de inclusões, visto que estes possuem procedimentos visuais de análise em microscópio. Com isso, o terceiro direcionamento do trabalho foi definido: barra laminada redonda, sem tratamento térmico e no ensaio de dureza Brinell.

O quarto Diagrama de Pareto é referente à quantidade de cada qualidade de aço produzida no ano de 2015 e pode ser visualizado na Figura 3.5.

Figura 3.5 Diagrama de Pareto: quantidade de ordens de produção por tipo de qualidade de aço produzida no período de 2015.



Conforme visto na Figura 3.5, o primeiro grupo, “OUTROS 190”, é a soma de 190 qualidades diferentes de aço, sendo o mais representativo. Porém, não é possível direcionar o estudo para este grupo, visto que ele é composto por diversos tipos de aço, com diferentes características e propriedades mecânicas. A idéia é focar em 1 qualidade de aço, não em um grupo com tantas propriedades distintas entre os componentes. Escolheu-se o grupo “H”, qualidade de aço SAE 52100A, pois mesmo não sendo o grupo mais representativo, no Diagrama de Pareto, é um aço cuja previsão de produção a partir do ano de 2016 está muito maior do que costumava ser. Além disso, outro motivo que levou a direcionar o estudo para o grupo H, e não para uma das qualidades que se encontra à esquerda do diagrama - que possui maior representatividade em termos percentuais – foi o fato de haver restrições internas na empresa, ligadas à acordos com clientes, impossibilitando uma reestruturação significativa do ensaio de dureza Brinell.

Sendo assim, o direcionamento completo deste presente trabalho foi: previsão do resultado de dureza Brinell para barra laminada redonda (inspecionada ou não), sem tratamento térmico, do aço SAE 52100, considerando todas as bitolas produzidas com essas especificações. As bitolas são: 28,58 mm, 30,16 mm, 33,34 mm, 36,51 mm, 42,86 mm, 44,45 mm, 50 mm, 50,80 mm, 57,15 mm e 60,33 mm. A Figura 3.6 ilustra uma imagem das bitolas, dispostas no software Excel.

Figura 3.6 Parte ilustrativa das bitolas obtidas no período de 2012 a 2015, conforme dados de dureza Brinell e composição química, dipostas no software Excel.

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Cu	Nb	Dureza HB	Esp. Durez	Bitola
0,98	0,24	0,33	1,39	0,06	0,02	0,005	0,002	0,14	0,0			
0,98	0,24	0,33	1,39	0,06	0,02	0,005	0,002	0,14	0,0			
0,98	0,24	0,33	1,39	0,06	0,02	0,005	0,002	0,14	0,0			
0,98	0,24	0,33	1,39	0,06	0,02	0,005	0,002	0,14	0,0			
0,98	0,24	0,34	1,39	0,06	0,02	0,006	0,003	0,14	0,0			
0,98	0,24	0,34	1,39	0,06	0,02	0,006	0,003	0,14	0,0			
0,98	0,24	0,34	1,39	0,06	0,02	0,006	0,003	0,14	0,0			
0,98	0,24	0,34	1,39	0,06	0,02	0,006	0,003	0,14	0,0			
0,98	0,24	0,34	1,39	0,06	0,02	0,006	0,003	0,14	0,0			
0,98	0,24	0,34	1,39	0,06	0,02	0,006	0,003	0,14	0,0			
0,98	0,24	0,34	1,39	0,06	0,02	0,006	0,003	0,14	0,0			
0,96	0,23	0,33	1,38	0,06	0,02	0,005	0,003	0,14	0,0			
0,96	0,23	0,33	1,38	0,06	0,02	0,005	0,003	0,14	0,0			
0,96	0,23	0,33	1,38	0,06	0,02	0,005	0,003	0,14	0,0			
0,96	0,23	0,33	1,38	0,06	0,02	0,005	0,003	0,14	0,0			
0,99	0,24	0,33	1,39	0,07	0,04	0,004	0,001	0,17	0,0			
0,99	0,24	0,33	1,39	0,07	0,04	0,004	0,001	0,17	0,0			
0,99	0,24	0,33	1,39	0,07	0,04	0,004	0,001	0,17	0,0			
0,99	0,24	0,33	1,39	0,07	0,04	0,004	0,001	0,17	0,0			
0,98	0,24	0,32	1,42	0,07	0,02	0,004	0,001	0,2	0,0			
0,98	0,24	0,32	1,42	0,07	0,02	0,004	0,001	0,2	0,0			
0,98	0,24	0,32	1,42	0,07	0,02	0,004	0,001	0,2	0,0			
0,98	0,24	0,32	1,42	0,07	0,02	0,004	0,001	0,2	0,0			
0,98	0,24	0,32	1,42	0,07	0,02	0,004	0,001	0,2	0,0			
0,98	0,24	0,32	1,42	0,07	0,02	0,004	0,001	0,2	0,0			
1	0,24	0,33	1,42	0,08	0,02	0,005	0,001	0,17	0,0			
1	0,24	0,33	1,42	0,08	0,02	0,005	0,001	0,17	0,0			
0,97	0,22	0,3	1,4	0,08	0,02	0,005	0,002	0,15	0,0			
0,97	0,22	0,3	1,4	0,08	0,02	0,005	0,002	0,15	0,0			
0,97	0,22	0,3	1,4	0,08	0,02	0,005	0,002	0,15	0,0			

Considerando que um ensaio de dureza Brinell leva aproximadamente 22 minutos no total, isto é, contando o tempo de corte e preparo do corpo de prova, junto com o tempo de ensaio, é possível estimar o ganho em termos de tempo – aumento da produtividade – caso seja possível validar os modelos teóricos que prevejam os resultados de dureza Brinell. Porém, é claro, garantindo a representatividade da corrida, para que esta possível redução seja efetuada de forma que a qualidade do produto não seja alterada.

Uma vez medido o tempo total despendido no ensaio de dureza Brinell, e verificada a quantidade de ensaios realizados de 2012 a 2015 (3 anos) para o aço SAE 52100, que foi de 283, pode-se estimar um ganho de, aproximadamente, 35 horas em 1 ano. Se fosse levado em consideração que, em 8 meses de 2016, houve 244 ensaios de dureza Brinell para essa

qualidade de aço (dado possível graças à etapa de obtenção de dados para validação das fórmulas, que será comentada mais à frente), o ganho em tempo será 134 horas em 1 ano.

3.1.3 Obtenção dos dados históricos de dureza Brinell e de composição química referente ao período de 2012 a 2015

O espectrômetro de emissão ótica e o durômetro são os equipamentos que registram e realizam, respectivamente, a composição química final do aço e a dureza do aço produzido, num corpo de prova, este preparado a partir de uma amostragem. Os equipamentos serão comentados com mais detalhes no subcapítulo 3.2. A partir dos resultados registrados desses equipamentos no sistema SAP, foi possível a obtenção dos dados históricos de dureza Brinell com sua respectiva composição química. Com o objetivo de obter o maior número de resultados possíveis, mas, ao mesmo tempo não podendo buscar dados de muitos anos anteriores (devido ao fato de, quanto maior o período de tempo que se buscam dados históricos, maior a probabilidade de incluir mudanças ocorridas em cadastro de materiais e no processo do mesmo), optou-se pelo período de 2012 a 2015, resultando em 283 resultados de dureza com sua respectiva composição química.

Da mesma forma que a obtenção de dados de produção referente ao período de 2015 (primeira etapa da metodologia, já citada acima), os dados obtidos vieram de uma forma totalmente desordenada, onde não era possível identificar qual composição química era referente a qual valor de dureza. Isso ocorreu devido ao sistema SAP devolver informações em janelas diferentes e o procedimento de organização dos dados, utilizando o software Excel também se fez necessário. Foi identificado uma variável comum entre resultados de dureza e resultados de composição química, o que possibilitou, manualmente, a aplicação de comandos adequados no Excel para ordenar todos esses resultados. Essa etapa levou, aproximadamente, 1 semana (menos que a organização dos dados de produção de 2015, pois eram muito menos dados). Para obtenção de dados no sistema SAP, foi preciso a movimentação de 1 pessoa da área de engenharia que tivesse conhecimento para a correta obtenção desses dados. A Figura 3.7 mostra uma parte dos dados organizados, com o objetivo de exemplificar como eles foram dispostos, retirada dos dados originais no Excel.

Figura 3.7 Parte ilustrativa dos dados históricos de resultados de dureza Brinell, dipostos no software Excel.

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Cu	Nb	Dureza HB	Esp. Dureza	Bitola
0,98	0,24	0,33	1,39	0,07	0,01	0,003	0,0026	0,18	0,001	311	280,0000-400,00	30,16
0,97	0,24	0,31	1,37	0,07	0,02	0,005	0,002	0,17	0,003	318	280,0000-400,00	30,16
0,98	0,23	0,31	1,36	0,06	0,02	0,005	0,0017	0,16	0,003	318	280,0000-400,00	30,16
1,04	0,23	0,31	1,41	0,08	0,04	0,006	0,0019	0,19	0,003	318	280,0000-400,00	30,16
1,04	0,23	0,34	1,39	0,1	0,02	0,005	0,002	0,17	0,001	320	280,0000-400,00	30,16
1	0,26	0,31	1,39	0,08	0,02	0,005	0,0017	0,15	0,001	324	280,0000-400,00	42,86
1,01	0,25	0,33	1,39	0,07	0,02	0,005	0,0017	0,2	0,001	325	0-390,0000	36,51
0,97	0,24	0,31	1,37	0,07	0,02	0,005	0,002	0,17	0,003	326	280,0000-400,00	30,16
0,97	0,24	0,34	1,38	0,07	0,02	0,004	0,001	0,12	0,003	327	280,0000-400,00	30,16
1,01	0,24	0,33	1,39	0,09	0,02	0,005	0,002	0,18	0,002	329	280,0000-400,00	30,16
1,04	0,23	0,34	1,39	0,1	0,02	0,005	0,002	0,17	0,001	329	280,0000-400,00	30,16
1,02	0,25	0,3	1,39	0,07	0,02	0,004	0,002	0,17	0,002	329	0-390,0000	36,51
1,04	0,25	0,32	1,37	0,08	0,02	0,004	0,003	0,15	0,002	331	280,0000-400,00	30,16
0,98	0,24	0,33	1,39	0,07	0,01	0,003	0,0026	0,18	0,001	332	280,0000-400,00	30,16
0,98	0,2	0,34	1,39	0,11	0,02	0,004	0,0014	0,15	0,002	332	280,0000-400,00	30,16
0,98	0,2	0,34	1,39	0,11	0,02	0,004	0,0014	0,15	0,002	332	280,0000-400,00	30,16
0,99	0,23	0,32	1,38	0,08	0,02	0,005	0,0019	0,17	0,002	334	280,0000-400,00	42,86
1	0,24	0,3	1,38	0,08	0,02	0,005	0,0019	0,14	0,001	334	280,0000-400,00	42,86
1,02	0,23	0,33	1,4	0,08	0,02	0,006	0,001	0,19	0,002	335	280,0000-400,00	30,16
0,98	0,22	0,3	1,39	0,08	0,02	0,004	0,0012	0,17	0,002	336	280,0000-400,00	60,33
0,98	0,21	0,32	1,37	0,09	0,02	0,005	0,0014	0,18	0,001	336	280,0000-400,00	60,33

Cada linha representa uma composição química e um resultado de dureza Brinell.

Foi gerado um gráfico com a disposição de todos os resultados de dureza Brinell obtidos durante o período, bem como os limites de especificação aceitáveis de dureza Brinell, para as diferentes bitolas. Havia mais de uma especificação aceitável, como por exemplo, limites de 0 a 400 HB, limites de 0 a 390 HB e limites de 280 a 400 HB. Isso varia conforme cadastro do material e é solicitado pelo cliente. Portanto, para o gráfico, foi plotado o intervalo mais restrito de limite de especificação, sendo de 280 HB a 390 HB. Isso por que o objetivo do gráfico era mostrar que, durante o período de 3 anos, nenhum resultado de dureza Brinell havia ficado fora desses limites. O gráfico está ilustrado na Figura 4.2 do Capítulo 4 - Resultados e Discussão.

Nenhum valor de dureza Brinell ficou fora do intervalo de especificação, o que garantiu seguir com este trabalho, visto que os resultados eram bastante estáveis, mostrando que não houve alguma causa especial que fizesse com que algum dos resultados viessem a ficar além desses limites.

3.1.4 Confiabilidade dos resultados gerados pelo durômetro

Em 2005, foi realizado um estudo de R&R, que significa teste de Repetibilidade e Reprodutibilidade, no durômetro do Laboratório Metalúrgico da empresa - Wolpert Dia Testor 2N - o qual foi responsável por gerar os dados históricos deste presente trabalho. O

sistema de medição do durômetro foi aprovado, o que significa que o sistema de medição utilizado é aceitável (SILVA da, 2006).

O teste R&R é a estimativa combinada da repetibilidade e reprodutibilidade, ou seja, a soma das variâncias do sistema de medição (dentro do sistema e entre sistemas) e representa a capacidade do sistema de medição (SILVA da, 2006).

Pode-se dizer que a reprodutibilidade é a variação nas médias de medições feitas por diferentes operadores. Referida normalmente como variação entre operadores (VO), embora seja a variação entre componentes do sistema. Já a repetibilidade seria a variação em medições obtidas com um instrumento, usado várias vezes por um mesmo operador, medindo a mesma característica da mesma peça. Referida normalmente como variação do equipamento (VE), embora as causas de uma baixa repetibilidade sejam várias (variação dentro do sistema). Exemplos de critérios utilizados na prática do estudo de R&R são (SILVA da, 2006):

- O operador deve estar fazendo as medições seguindo o procedimento.
- Os operadores devem ser selecionados dentre aqueles que realizam as medições normalmente.
- As peças devem ser representativas da variabilidade natural do processo.

Há, ainda, uma particularidade no sistema de medição do equipamento Wolpert Dia Testor 2N, que intensifica a confiabilidade dos resultados de dureza Brinell. A partir de um dispositivo acoplado a um paquímetro digital, os dados são transferidos para o sistema interno da empresa, o que evita possíveis erros de leitura, já que dispensa utilização de regras manuais. Após a medida das diagonais conforme descrito, há um comando de macro no software Excel que calcula automaticamente o valor da dureza em HB, aparecendo instantaneamente o valor na tela. Além disso, há um sistema de *Pokayoke*, criado especialmente para o ensaio de dureza. É gerado um aviso na tela quando as medidas das duas diagonais d1 e d2 apresentem uma diferença entre si acima de 1 mm. Caso essa diferença seja maior que 1 mm, deve-se repetir o ensaio. Isso também contribui para a confiabilidade dos resultados, pois diminui a probabilidade de erros.

Por fim, há mais dois fatores relevantes a serem comentados, que contribuem para a qualidade dos resultados gerados pelo durômetro. O primeiro é que os operadores utilizam

Padrões Primários, os quais são designados ou amplamente reconhecidos por possuírem as mais altas qualidades metrológicas e cujos valores são aceitos sem referência a outros padrões de mesma grandeza. Esse conceito se aplica tanto para grandezas de base quanto para grandezas derivadas (Instituto de Pesos e Medidas do Estado de São Paulo, 2016). Já o segundo fator é a calibração do equipamento de dureza, Wolpert Dia Testor 2N, que ocorre em períodos pré-estabelecidos e é realizada apenas por laboratórios terceirizados vinculados à RBC (Rede Brasileira de Calibração), ou em laboratórios que possuam certificação pela Norma ISO IEC 17.025. Essa é mais uma forma de garantir a qualidade dos resultados transmitidos pelo durômetro.

3.1.5 Obtenção de fórmulas carbono equivalente mais adequadas

A partir da literatura metalúrgica, conforme o subcapítulo 2.4, foram escolhidas as fórmulas de carbono equivalente mais representativas para a qualidade de aço SAE 52100 e para prever a dureza, com as justificativas descritas em detalhe no subcapítulo. Para facilitar a leitura, optou-se por repetir a Tabela 2.8, a qual mostra as 6 fórmulas escolhidas, com a representação em modelos numerados. Essa etapa despendeu 15 dias, para que se pudesse buscar conhecimento nos artigos e estudos recentes referentes à carbono equivalente.

Tabela 2.8 Resumo das fórmulas de carbono equivalente, com valores dos elementos químicos em % em massa, utilizadas neste Trabalho de Diplomação, com a respectiva numeração do Modelo que irá representar.

Título do Carbono Equivalente	Fórmula do Carbono Equivalente	Numeração do Carbono Equivalente
CE_{WM}	$C + (Mn + Cr + V + Si)/6 + (Mo/4) + (Nb/9) + (Ti/3) + (Cu/20) + (Ni/25) + 5B$	1
AWS D1.1	$C + (Mn + Si)/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$	2
Stout and Doty	$C + (Mn/6) + (Ni/20) + (Cr + Mo)/10 + (Cu/40)$	3
CE^A_{IW}	$C + (Mn/6) + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$	4
Dearden-O'Neill	$C + (Mn/6) + (Mo/4) + (Ni/15) + (Cr/5)$	5
Yurioka (CEN)	$C + f(C)\{Si/24 + Mn/6 + Cu/15 + Ni/20 + (Cr + Mo + Nb + V)/5 + 5B\} f(C) = 0.75 + 0.25 \tanh\{20(C-0.12)\}$	6

3.1.6 Obtenção dos modelos teóricos (7 equações de dureza brinell)

Utilizando a fórmula da Equação 2.11, $HB_x = F_x \cdot Ceq_x$, pode-se chegar no valor de dureza, conforme dados valores de dados históricos de dureza brinell e de composição química. A variável F_x é um fator calculado a partir de uma operação de divisão de somatórios de resultados dos dados históricos. A divisão é entre: o somatório de durezas históricas dividido pela quantidade de resultados obtidos e o somatório de resultados de carbono equivalente (de cada modelo) dividido pela quantidade de resultados obtidos. As Equações 2.12 ilustra o fator calculado. A Equação 2.13 representa como fica quando aplicado um dos modelos de carbono equivalente, calculado o fator (no exemplo, o 1).

$$F1 = \frac{\frac{\sum HB}{\text{quantidade de dados}}}{\frac{\sum Ceq1}{\text{quantidade de dados}}}, \text{Equação (2.12)}$$

Resultando em:

$$HB1 = F1 \cdot Ceq1, \text{Equação (2.13)}.$$

Na primeira parte, que foi obter os cálculos dos fatores F_x (juntamente com os cálculos dos carbonos equivalente e somatório de valores de durezas, divididos por ‘n’), foram envolvidos apenas dados de resultados históricos, conforme mostra a Equação 2.12. Uma ilustração de parte dos dados, para fins de exemplo, pode ser verificada na Figura 3.8, a qual foi retirada da tabela original em Excel.

Figura 3.8 Representação de parte dos dados históricos de dureza Brinell e de composição química, juntamente com os cálculos dos fatores Fx, conforme a Equação 2.12, dispostos no Excel.

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Cu	Nb	Ceq1 CEWM	Ceq2 AWS D1.1	Ceq3 Stout and Doty	Ceq4 CEIHW	Ceq5 Dearden-O'neill	Ceq6 YURIOKA	-	Dureza HB	
1,04	0,26	0,33	1,41	0,07	0,02	0,004	0,003	0,13	0,001	1,389311111	1,438466667	1,24475	1,395133333	1,386666667	1,405		372	
1,01	0,25	0,33	1,4	0,07	0,02	0,005	0,002	0,18	0,003	1,358633333	1,408333333	1,215	1,366666667	1,354666667	1,376516667		346	
1,01	0,25	0,33	1,4	0,07	0,02	0,005	0,002	0,18	0,003	1,358633333	1,408333333	1,215	1,366666667	1,354666667	1,376516667		359	
1,01	0,25	0,33	1,4	0,07	0,02	0,005	0,002	0,18	0,003	1,358633333	1,408333333	1,215	1,366666667	1,354666667	1,376516667		360	
1,01	0,25	0,31	1,41	0,07	0,02	0,005	0,003	0,14	0,003	1,3553	1,404333333	1,211666667	1,362666667	1,353333333	1,372516667		352	
1,03	0,26	0,35	1,42	0,08	0,02	0,005	0,002	0,14	0,003	1,385366667	1,435333333	1,239833333	1,392	1,382666667	1,4021		348	
1,03	0,26	0,35	1,42	0,08	0,02	0,005	0,002	0,14	0,003	1,385366667	1,435333333	1,239833333	1,392	1,382666667	1,4021		351	
1,03	0,26	0,35	1,42	0,08	0,02	0,005	0,002	0,14	0,003	1,385366667	1,435333333	1,239833333	1,392	1,382666667	1,4021		359	
1,03	0,26	0,35	1,42	0,08	0,02	0,005	0,002	0,14	0,003	1,385366667	1,435333333	1,239833333	1,392	1,382666667	1,4021		359	
1,01	0,27	0,29	1,41	0,08	0,02	0,005	0,003	0,17	0,003	1,3571	1,407	1,209583333	1,362	1,350666667	1,372516667		366	
1	0,24	0,3	1,39	0,07	0,02	0,004	0,002	0,16	0,002	1,339022222	1,388133333	1,1985	1,348133333	1,337666667	1,357366667		361	
1	0,24	0,3	1,39	0,07	0,02	0,004	0,002	0,16	0,002	1,339022222	1,388133333	1,1985	1,348133333	1,337666667	1,357366667		365	
1	0,25	0,33	1,4	0,07	0,02	0,005	0,002	0,17	0,003	1,348033333	1,397666667	1,20475	1,356	1,344666667	1,36585		341	
1	0,25	0,33	1,4	0,07	0,02	0,005	0,002	0,17	0,003	1,348033333	1,397666667	1,20475	1,356	1,344666667	1,36585		349	
1	0,24	0,32	1,39	0,07	0,02	0,005	0,002	0,16	0,002	1,342422222	1,391666667	1,201833333	1,351666667	1,341	1,3609		336	
1	0,24	0,32	1,39	0,07	0,02	0,005	0,002	0,16	0,002	1,342422222	1,391666667	1,201833333	1,351666667	1,341	1,3609		362	
1	0,25	0,32	1,39	0,07	0,02	0,005	0,002	0,18	0,003	1,345366667	1,394666667	1,202333333	1,353	1,341	1,36285		361	
1	0,25	0,32	1,39	0,07	0,02	0,005	0,002	0,18	0,003	1,345366667	1,394666667	1,202333333	1,353	1,341	1,36285		379	
1,03	0,26	0,3	1,38	0,08	0,02	0,005	0,002	0,15	0,002	1,370755556	1,419666667	1,22775	1,376333333	1,366333333	1,386233333		363	
1,01	0,25	0,31	1,38	0,09	0,05	0,005	0,002	0,17	0,003	1,359666667	1,407666667	1,213416667	1,366	1,356166667	1,375516667		342	
1,03	0,24	0,32	1,4	0,06	0,02	0,005	0,002	0,16	0,002	1,373688889	1,423	1,232333333	1,383	1,372333333	1,3924		341	
1,02	0,23	0,33	1,4	0,08	0,02	0,006	0,001	0,19	0,002	1,365922222	1,416533333	1,22575	1,3782	1,365333333	1,38685		335	
1,02	0,23	0,33	1,4	0,08	0,02	0,006	0,001	0,19	0,002	1,365922222	1,416533333	1,22575	1,3782	1,365333333	1,38685		339	
1,02	0,23	0,33	1,4	0,08	0,02	0,006	0,001	0,19	0,002	1,365922222	1,416533333	1,22575	1,3782	1,365333333	1,38685		341	
1,03	0,26	0,31	1,41	0,08	0,02	0,005	0,002	0,17	0,002	1,378322222	1,428666667	1,232916667	1,385333333	1,374	1,395233333		354	
1,04	0,23	0,31	1,41	0,08	0,04	0,006	0,002	0,19	0,003	1,389666667	1,4392	1,245416667	1,400866667	1,389	1,409716667		318	
1,01	0,25	0,33	1,39	0,07	0,02	0,005	0,002	0,2	0,001	1,357644444	1,407666667	1,2145	1,366	1,352666667	1,37545		325	
1,01	0,25	0,33	1,39	0,07	0,02	0,005	0,002	0,2	0,001	1,357644444	1,407666667	1,2145	1,366	1,352666667	1,37545		343	
										SOMA Ceq	376,2090667	390,2905333	336,4598333	379,0555333	376,1028333	381,5585833	SOMA DUREZAS	100676
										SOMA Ceq / n	1,32936066	1,379118492	1,188904005	1,339418846	1,328985277	1,348263545	SOMA DUREZAS / n	355,745583
										FATOR	267,6065223	257,951427	299,2214524	265,5969671	267,68211	263,8546331		

A segunda parte, foi constituída por descrever as 7 equações de dureza Brinell teóricas (7 modelos teóricos): 6 equações por uso das fórmulas de carbono equivalentes do respectivo modelo e 1 equação gerada através de uma regressão linear múltipla no software Minitab. Para os modelos teóricos via carbono equivalente, foi utilizado o software Excel. Nessa etapa, serão apresentados os modelos teóricos, os quais, na etapa seguinte, serão validados com dados obtidos no período de 8 meses do ano de 2016. Os modelos teóricos são descritos na Tabela 3.2, a seguir.

Tabela 3.2 Apresentação dos 7 Modelos teóricos desenvolvidos com seus respectivos cálculos. Continua nas 2 próximas páginas.

MODELO	CÁLCULOS DO MODELO	
<p style="text-align: center;"><u>Modelo 1</u></p> $HB1 = F1 \cdot Ceq1$ $HB1 = 267,61 \cdot \left[C + \frac{Mn + Cr + V + Si}{6} + \left(\frac{Mo}{4}\right) + \left(\frac{Nb}{9}\right) + \left(\frac{Ti}{3}\right) + \left(\frac{Cu}{20}\right) + \left(\frac{Ni}{25}\right) + 5B \right]$	$F1 = \frac{\frac{\sum HB}{\text{quantidade de dados}}}{\frac{\sum Ceq1}{\text{quantidade de dados}}}$ <p>Onde HB e Ceq são retirados de resultados históricos.</p>	$F1 = \frac{\frac{100676}{283}}{\frac{376,2090666666667}{283}}$ $F1 = 267,606522330846$
<p style="text-align: center;"><u>Modelo 2</u></p> $HB2 = F2 \cdot Ceq2$ $HB2 = 257,95 \cdot \left[C + \frac{Mn + Si}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \right]$	$F2 = \frac{\frac{\sum HB}{\text{quantidade de dados}}}{\frac{\sum Ceq2}{\text{quantidade de dados}}}$ <p>Onde HB e Ceq são retirados de resultados históricos.</p>	$F2 = \frac{\frac{100676}{283}}{\frac{390,2905333333334}{283}}$ $F2 = 257,951426954074$
<p style="text-align: center;"><u>Modelo 3</u></p> $HB3 = F3 \cdot Ceq3$ $HB3 = 299,22 \cdot \left[C + \left(\frac{Mn}{6}\right) + \left(\frac{Ni}{20}\right) + \frac{Cr + Mo}{10} + \left(\frac{Cu}{40}\right) \right]$	$F3 = \frac{\frac{\sum HB}{\text{quantidade de dados}}}{\frac{\sum Ceq3}{\text{quantidade de dados}}}$ <p>Onde HB e Ceq são retirados de resultados históricos.</p>	$F3 = \frac{\frac{100676}{283}}{\frac{336,4598333333333}{283}}$ $F3 = 299,221452387333$

<p style="text-align: center;"><u>Modelo 4</u></p> <p>$HB4 = F4 \cdot Ceq4$</p> $HB4 = 265,60 \cdot \left[C + \left(\frac{Mn}{6} \right) + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \right]$	$F4 = \frac{\frac{\sum HB}{\text{quantidade de dados}}}{\frac{\sum Ceq4}{\text{quantidade de dados}}}$ <p>Onde HB e Ceq são retirados de resultados históricos.</p>	$F4 = \frac{\frac{100676}{283}}{\frac{379,0555333333333}{283}}$ $F4 = 265,596967058301$
<p style="text-align: center;"><u>Modelo 5</u></p> <p>$HB5 = F5 \cdot Ceq5$</p> $HB5 = 267,70 \cdot \left[C + \left(\frac{Mn}{6} \right) + \left(\frac{Mo}{4} \right) + \left(\frac{Ni}{15} \right) + \left(\frac{Cr}{5} \right) \right]$	$F5 = \frac{\frac{\sum HB}{\text{quantidade de dados}}}{\frac{\sum Ceq5}{\text{quantidade de dados}}}$ <p>Onde HB e Ceq são retirados de resultados históricos.</p>	$F5 = \frac{\frac{100676}{283}}{\frac{376,1028333333334}{283}}$ $F5 = 267,682109990308$
<p style="text-align: center;"><u>Modelo 6</u></p> <p>$HB6 = F6 \cdot Ceq6$</p> $HB6 = 263,85 \cdot \left[C + f(C) \left\{ \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr + Mo + Nb + V}{5} + 5B \right\} \right]$ <p>Sendo $f(C) = 0.75 + 0.25 \tanh \{20(C - 0.12)\}$</p>	$F6 = \frac{\frac{\sum HB}{\text{quantidade de dados}}}{\frac{\sum Ceq6}{\text{quantidade de dados}}}$ <p>Onde HB e Ceq são retirados de resultados históricos.</p>	$F6 = \frac{\frac{100676}{283}}{\frac{381,5585833333334}{283}}$ $F6 = 263,85463306967$

Modelo 7 (Regressão Linear Múltipla)

$$HB7 = 159 - 157C + 76,5Si - 18,0Mn + 258Cr + 8,1Ni + 65Mo - 2915V - 812Ti - 59,8Cu + 568Nb$$

A Figura 3.9 ilustra uma representação dos dados históricos dispostos no software Minitab, para, então, se iniciar com o comando de regressão linear múltipla.

Figura 3.9 Representação de parte dos dados históricos de dureza Brinell e de composição química, juntamente com os valores das bitolas e limites de especificação de dureza, dispostos no Minitab.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12-T	C13
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Cu	Nb	Dureza HB	Esp. Dureza	Bitola
1	0,98	0,24	0,330	1,39	0,06	0,02	0,005	0,0018	0,14	0,002	344,0	280,0000-400,00	28,58
2	0,98	0,24	0,330	1,39	0,06	0,02	0,005	0,0018	0,14	0,002	350,0	280,0000-400,00	28,58
3	0,98	0,24	0,330	1,39	0,06	0,02	0,005	0,0018	0,14	0,002	360,0	0-390,0000	28,58
4	0,98	0,24	0,330	1,39	0,06	0,02	0,005	0,0018	0,14	0,002	360,0	280,0000-400,00	28,58
5	0,98	0,24	0,340	1,39	0,06	0,02	0,006	0,0026	0,14	0,004	346,0	280,0000-400,00	28,58
6	0,98	0,24	0,340	1,39	0,06	0,02	0,006	0,0026	0,14	0,004	347,0	280,0000-400,00	50,80
7	0,98	0,24	0,340	1,39	0,06	0,02	0,006	0,0026	0,14	0,004	351,0	280,0000-400,00	50,80
8	0,98	0,24	0,340	1,39	0,06	0,02	0,006	0,0026	0,14	0,004	351,0	280,0000-400,00	50,80
9	0,98	0,24	0,340	1,39	0,06	0,02	0,006	0,0026	0,14	0,004	352,0	280,0000-400,00	28,58
10	0,98	0,24	0,340	1,39	0,06	0,02	0,006	0,0026	0,14	0,004	355,0	280,0000-400,00	28,58
11	0,96	0,23	0,330	1,38	0,06	0,02	0,005	0,0030	0,14	0,002	348,0	280,0000-400,00	50,80
12	0,96	0,23	0,330	1,38	0,06	0,02	0,005	0,0030	0,14	0,002	349,0	280,0000-400,00	50,80
13	0,96	0,23	0,330	1,38	0,06	0,02	0,005	0,0030	0,14	0,002	354,0	280,0000-400,00	50,80
14	0,96	0,23	0,330	1,38	0,06	0,02	0,005	0,0030	0,14	0,002	359,0	280,0000-400,00	28,58
15	0,96	0,23	0,330	1,38	0,06	0,02	0,005	0,0030	0,14	0,002	367,0	0-390,0000	36,51
16	0,99	0,24	0,330	1,39	0,07	0,04	0,004	0,0014	0,17	0,002	343,0	280,0000-400,00	50,80
17	0,99	0,24	0,330	1,39	0,07	0,04	0,004	0,0014	0,17	0,002	348,0	280,0000-400,00	57,15
18	0,99	0,24	0,330	1,39	0,07	0,04	0,004	0,0014	0,17	0,002	360,0	280,0000-400,00	50,80
19	0,99	0,24	0,330	1,39	0,07	0,04	0,004	0,0014	0,17	0,002	364,0	280,0000-400,00	50,80
20	0,98	0,24	0,320	1,42	0,07	0,02	0,004	0,0013	0,20	0,002	352,0	280,0000-400,00	50,80
21	0,98	0,24	0,320	1,42	0,07	0,02	0,004	0,0013	0,20	0,002	357,0	280,0000-400,00	57,15
22	0,98	0,24	0,320	1,42	0,07	0,02	0,004	0,0013	0,20	0,002	359,0	280,0000-400,00	57,15
23	0,98	0,24	0,320	1,42	0,07	0,02	0,004	0,0013	0,20	0,002	359,0	280,0000-400,00	57,15
24	0,98	0,24	0,320	1,42	0,07	0,02	0,004	0,0013	0,20	0,002	364,0	280,0000-400,00	42,86

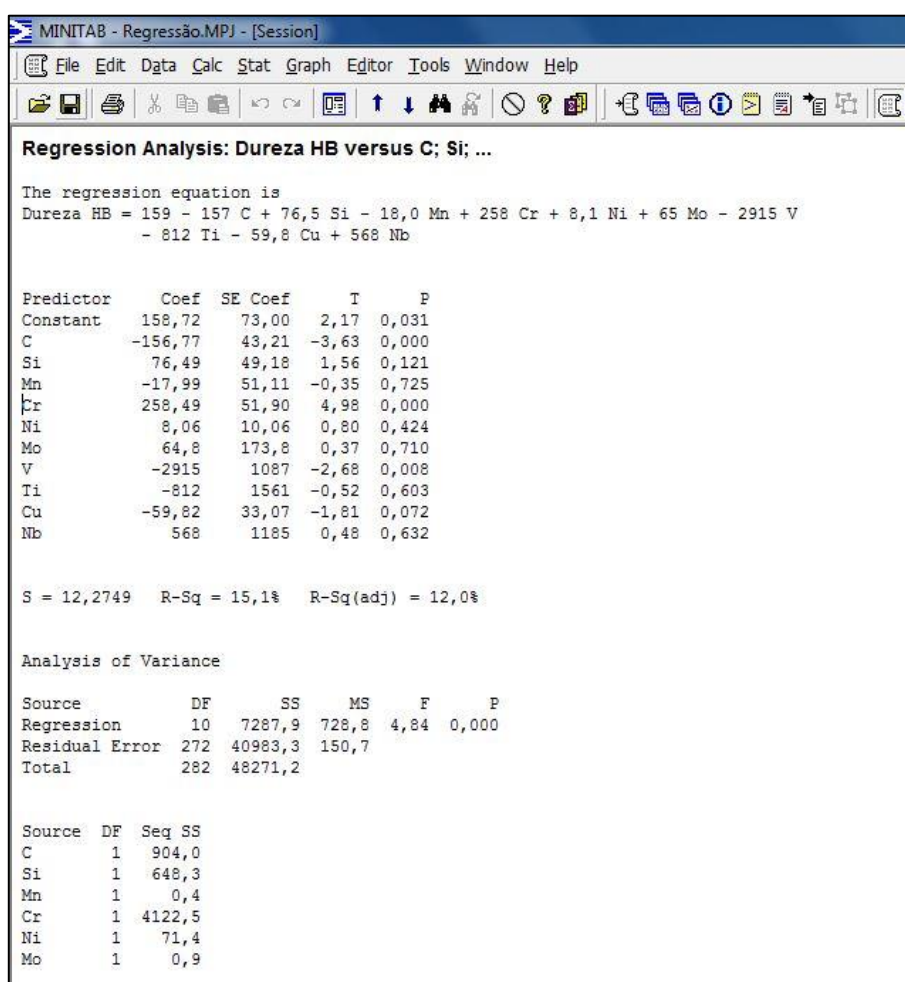
Uma ação que foi efetuada logo antes de gerar a equação via regressão linear múltipla definitiva, foi o verificar qual a relação de influência de cada elemento químico dos dados históricos em cada um dos respectivos valores de dureza Brinell, ao mesmo tempo que, pode-se verificar a relação entre bitola e valor de dureza Brinell. Gera-se, então, uma equação linear múltipla com os elementos químicos e com os valores de bitola, para verificar o valor de ‘p’ (P-value) e afirmar se cada uma das variáveis possuem, ou não, influência estatística no valor da dureza Brinell. A tabela de valores de p para cada um dos elementos químicos e R^2 é gerada automaticamente junto com a regressão linear múltipla, que leva em consideração as variáveis que foram selecionadas para a equação.

O valor de p relacionado à bitola foi alto, o que indicou que a bitola não influenciava estatisticamente no valor de dureza Brinell. Logo, o direcionamento deste trabalho foi de modo que não houvesse necessidade de separar as bitolas em grupos, desenvolvendo um

modelo teórico para cada um desses grupos. Foi possível continuar o trabalho com a ideia de que 1 modelo teórico seria suficiente para todos os resultados de dureza, contemplando as diferentes bitolas. Detalhes sobre os resultados desta etapa são apresentados no Capítulo 4 – Resultados e Discussão.

A partir da ideia que a bitola não influencia estatisticamente no valor da dureza, foi gerada uma equação de regressão linear múltipla apenas com os elementos químicos, conforme mostra a Figura 3.10. Essa equação é o Modelo 7, e está ilustrada na Tabela 3.2, já citada.

Figura 3.10 Representação da equação gerada por regressão linear múltipla, sem considerar a bitola como sendo uma das variáveis. Tabelas de valores de p e R² são geradas, indicando valores de p de cada um dos elementos e 1 valor de R². Imagem retirada do Minitab.



O tempo despendido para essa etapa foi, no total, 5 dias, pois foi necessário consultar material referentes ao software Minitab, como por exemplo, manual de instrução, bem como solicitar ajuda de uma pessoa especializada em estatística para opinar quanto aos

valores gerados, como “p” e “R²”. O R² representa o quanto o modelo é explicado pelo uso das variáveis. Logo, quanto maior seu valor, melhor. Seu resultado também será discutido no Capítulo 4.

3.1.7 Obtenção dos dados de dureza Brinell e de composição química referente ao período de janeiro a setembro de 2016

Essa sétima etapa foi destinada a obter dados para validar os modelos teóricos, conforme estão ilustrados na Tabela 3.2. Primeiro, foi necessário buscar os dados no sistema MES, novo sistema interno da empresa, que entrou em vigor em janeiro de 2016. Como pode ser percebido, os dados para validação dos modelos são diferentes dos dados que geraram os modelos, pois o objetivo é verificar os valores que eles geram e compará-los com os valores de dureza deste período. Foi necessário obter conhecimento sobre o sistema, visto que era um novo sistema e muitos comandos eram de conhecimento de poucos na Usina. Mesmo sendo mais fácil a obtenção dos dados nesse sistema, foi preciso 2 semanas para obtê-los de forma clara, visto que foi necessário utilizar diversos filtros nos materiais cadastrados, qualidade de aço, etc. Foi utilizado, para auxílio, o software Excel, pois os dados obtidos ficavam dispostos nesse formato de arquivo.

Tendo os dados de composição química e dureza Brinell, verificou-se a falta de 2 elementos químicos nos relatórios gerados. Esses elementos eram necessários, pois são variáveis nos modelos de carbono equivalente utilizados nesse Trabalho de Diplomação. Isso ocorreu devido ao fato de o sistema só gerar relatórios com informações solicitadas pelos clientes, o que muitas vezes não condiz com as informações que o usuário necessita para seu estudo. Portanto, foi necessário buscar - de forma manual - os 2 elementos químicos faltantes, para completar os 244 resultados de dureza Brinell e composição química em um outro programa interno da empresa, chamado STP. Novamente, cada linha representa uma composição química e um resultado de dureza Brinell, logo, há 244 linhas.

A Figura 3.11 ilustra parte representativa dos 244 dados de dureza Brinell e de composição química, obtidos de janeiro a setembro de 2016, dispostos no software Excel.

Figura 3.11 Representação dos dados de dureza Brinell e de composição química obtidos no sistema MES, referentes ao período de janeiro a setembro de 2016.

Amostra	V %	Nb %	C %	Mn %	Si %	Cr %	Ni %	Mo %	Cu %	Ti %	Dureza Prática em HB	Bitola	Limite de Escape.
1	0,007	0,002	0,99	0,32	0,24	1,4	0,08	0,02	0,2	0,0012	359	42,86	280,0000-400,00
2	0,006	0,002	0,98	0,32	0,24	1,39	0,06	0,02	0,24	0,0016	355	42,86	280,0000-400,00
3	0,006	0,002	0,98	0,32	0,24	1,39	0,06	0,02	0,24	0,0016	363	42,86	280,0000-400,00
4	0,006	0,002	0,98	0,32	0,24	1,39	0,06	0,02	0,24	0,0016	358	42,86	280,0000-400,00
5	0,007	0,002	0,97	0,32	0,25	1,38	0,09	0,02	0,16	0,002	362	42,86	280,0000-400,00
6	0,007	0,002	0,97	0,32	0,25	1,38	0,09	0,02	0,16	0,002	366	42,86	280,0000-400,00
7	0,007	0,002	0,97	0,32	0,25	1,38	0,09	0,02	0,16	0,002	373	42,86	280,0000-400,00
8	0,007	0,001	0,98	0,32	0,24	1,38	0,07	0,02	0,15	0,002	370	42,86	280,0000-400,00
9	0,006	0,002	0,98	0,33	0,25	1,38	0,07	0,02	0,13	0,002	368	42,86	280,0000-400,00
10	0,006	0,002	1	0,32	0,27	1,37	0,07	0,02	0,15	0,001	351	42,86	280,0000-400,00
11	0,008	0,003	0,98	0,36	0,24	1,4	0,08	0,04	0,16	0,002	362	42,86	280,0000-400,00
12	0,008	0,003	0,98	0,36	0,24	1,4	0,08	0,04	0,16	0,002	345	42,86	280,0000-400,00
13	0,009	0,002	0,98	0,34	0,24	1,38	0,07	0,04	0,14	0,0013	354	42,86	280,0000-400,00
14	0,009	0,002	0,98	0,34	0,24	1,38	0,07	0,04	0,14	0,0013	352	42,86	280,0000-400,00
15	0,009	0,002	1	0,36	0,24	1,4	0,08	0,02	0,16	0,0021	355	42,86	280,0000-400,00
16	0,009	0,002	1	0,36	0,24	1,4	0,08	0,02	0,16	0,0021	360	42,86	280,0000-400,00
17	0,009	0,002	0,98	0,37	0,25	1,41	0,07	0,02	0,14	0,0016	347	42,86	280,0000-400,00
18	0,009	0,002	0,98	0,37	0,25	1,41	0,07	0,02	0,14	0,0016	364	42,86	280,0000-400,00
19	0,007	0,002	0,96	0,36	0,23	1,41	0,07	0,02	0,14	0,0011	350	42,86	280,0000-400,00
20	0,008	0,002	0,98	0,35	0,25	1,37	0,09	0,03	0,14	0,0016	353	42,86	280,0000-400,00
21	0,011	0,003	0,99	0,33	0,23	1,38	0,06	0,02	0,15	0,0016	362	42,86	280,0000-400,00
22	0,008	0,002	0,97	0,36	0,22	1,38	0,07	0,02	0,17	0,0012	350	42,86	280,0000-400,00
23	0,006	0,003	0,96	0,36	0,26	1,41	0,09	0,03	0,15	0,002	372	42,86	280,0000-400,00
24	0,006	0,003	0,96	0,36	0,26	1,41	0,09	0,03	0,15	0,002	351	42,86	280,0000-400,00
25	0,006	0,003	0,96	0,35	0,26	1,37	0,08	0,04	0,14	0,0025	348	42,86	280,0000-400,00
26	0,006	0,001	0,97	0,35	0,24	1,39	0,07	0,02	0,15	0,002	362	42,86	280,0000-400,00

As bitolas obtidas nesse período não foram exatamente as mesmas obtidas no período em que os dados históricos foram obtidos. São elas: 28,58 mm, 33,34 mm, 36,51 mm, 42,86 mm, 50,8 mm, 57,15 mm. A Figura 3.12 ilustra uma imagem das bitolas, dispostas no software Excel.

Figura 3.12 Parte ilustrativa das bitolas obtidas no período de 2016, conforme dados de dureza Brinell e composição química, dipostas no software Excel.

Amostr	V %	Nb %	C %	Mn %	Si %	Cr %	Ni %	Mo %	Cu %	Ti %	Dureza Prática em H	Bitola	Limite de Escp
1	0,007	0,002	0,99	0,32	0,24	1,4	0,08	0,02	0,2				280,0000-400,00
2	0,006	0,002	0,98	0,32	0,24	1,39	0,06	0,02	0,24				280,0000-400,00
3	0,006	0,002	0,98	0,32	0,24	1,39	0,06	0,02	0,24				280,0000-400,00
4	0,006	0,002	0,98	0,32	0,24	1,39	0,06	0,02	0,24				280,0000-400,00
5	0,007	0,002	0,97	0,32	0,25	1,38	0,09	0,02	0,16				280,0000-400,00
6	0,007	0,002	0,97	0,32	0,25	1,38	0,09	0,02	0,16				280,0000-400,00
7	0,007	0,002	0,97	0,32	0,25	1,38	0,09	0,02	0,16				280,0000-400,00
8	0,007	0,001	0,98	0,32	0,24	1,38	0,07	0,02	0,15				280,0000-400,00
9	0,006	0,002	0,98	0,33	0,25	1,38	0,07	0,02	0,13				280,0000-400,00
10	0,006	0,002	1	0,32	0,27	1,37	0,07	0,02	0,15				280,0000-400,00
11	0,008	0,003	0,98	0,36	0,24	1,4	0,08	0,04	0,16				280,0000-400,00
12	0,008	0,003	0,98	0,36	0,24	1,4	0,08	0,04	0,16				280,0000-400,00
13	0,009	0,002	0,98	0,34	0,24	1,38	0,07	0,04	0,14				280,0000-400,00
14	0,009	0,002	0,98	0,34	0,24	1,38	0,07	0,04	0,14				280,0000-400,00
15	0,009	0,002	1	0,36	0,24	1,4	0,08	0,02	0,16				280,0000-400,00
16	0,009	0,002	1	0,36	0,24	1,4	0,08	0,02	0,16				280,0000-400,00
17	0,009	0,002	0,98	0,37	0,25	1,41	0,07	0,02	0,14				280,0000-400,00
18	0,009	0,002	0,98	0,37	0,25	1,41	0,07	0,02	0,14				280,0000-400,00
19	0,007	0,002	0,96	0,36	0,23	1,41	0,07	0,02	0,14				280,0000-400,00
20	0,008	0,002	0,98	0,35	0,25	1,37	0,09	0,03	0,14				280,0000-400,00
21	0,011	0,003	0,99	0,33	0,23	1,38	0,06	0,02	0,15				280,0000-400,00
22	0,008	0,002	0,97	0,36	0,22	1,38	0,07	0,02	0,17				280,0000-400,00
23	0,006	0,003	0,96	0,36	0,26	1,41	0,09	0,03	0,15	0,002	372	42,86	280,0000-400,00
24	0,006	0,003	0,96	0,36	0,26	1,41	0,09	0,03	0,15	0,002	351	42,86	280,0000-400,00

Havendo 7 modelos teóricos e outros dados, diferentes dos que geraram dos modelos, é possível validar os modelos. Essa foi a última fase dessa etapa e foi obtida através

do uso de planilhas no Excel. Conforme as equações dos modelos ilustrados na Tabela 3.2, as variáveis – que são os elementos químicos - foram preenchidas com os 244 valores de composição química (do ano de 2016), gerando, assim, um valor de dureza Brinell. Com isso, foi possível obter 244 resultados de dureza Brinell para cada um dos 7 modelos teóricos, gerando num total de 1708 resultados de dureza Brinell, que foram comparados, um a um, com os respectivos resultados de dureza Brinell obtidas no conjunto de dados de 2016, chamados de “dureza Prática HB”, na 12ª coluna da Figura 3.11.

Dessa forma, foi possível validar os modelos, bem como avaliar qual o modelo que gerou maior e menor número de erros, e o modelo que gerou o maior dos erros e o menor. Essa etapa de avaliação do melhor será discutida no Capítulo 4.

A Figura 3.13 ilustra uma parte dos 244 resultados obtidos de dureza Brinell para cada um dos 7 modelos teóricos. Os valores gerados por cada um dos modelos foram arredondados apenas no final, levando em consideração todas as casas decimais possíveis para o cálculo dos modelos, conforme foi ilustrado na Tabela 3.2. A nomenclatura dos modelos na Figura 3.13 está de acordo com a fórmula do carbono equivalente utilizada, porém, podem também ser chamado de Modelo 1, Modelo 2, Modelo 3, Modelo 4, Modelo 5 e Modelo 6, conforme foi ilustrado na Tabela 2.8.

Figura 3.13 Ilustração de parte da tabela gerada no Excel dos 244 resultados obtidos de dureza Brinell a partir de cada um dos 7 modelos teórico, bem como os valores de dureza Brinell Prática obtidos em nos dados de 2016.

Dureza Prática em HB	Bitola	Limite de Escope.	Modelo CE _{VM}	Modelo AWS D1.1	Modelo Stout and Doty	Modelo CE _{HW}	Modelo Dearden-Neill	Modelo YURIOKA	Modelo Minitab
359	42,86	280,0000-400,00	358	358	357	358	357	358	347
355	42,86	280,0000-400,00	355	355	354	355	353	355	346
363	42,86	280,0000-400,00	355	355	354	355	353	355	346
358	42,86	280,0000-400,00	355	355	354	355	353	355	346
362	42,86	280,0000-400,00	352	352	351	351	351	351	348
366	42,86	280,0000-400,00	352	352	351	351	351	351	348
373	42,86	280,0000-400,00	352	352	351	351	351	351	348
370	42,86	280,0000-400,00	353	353	353	353	353	353	345
368	42,86	280,0000-400,00	354	354	354	353	354	353	350
351	42,86	280,0000-400,00	360	359	359	358	358	358	346
362	42,86	280,0000-400,00	358	357	357	357	357	357	349
345	42,86	280,0000-400,00	358	357	357	357	357	357	349
354	42,86	280,0000-400,00	356	355	355	355	355	355	342
352	42,86	280,0000-400,00	356	355	355	355	355	355	342
355	42,86	280,0000-400,00	362	362	362	362	361	362	341
360	42,86	280,0000-400,00	362	362	362	362	361	362	341
347	42,86	280,0000-400,00	357	357	357	357	357	357	348
364	42,86	280,0000-400,00	357	357	357	357	357	357	348
350	42,86	280,0000-400,00	351	351	350	351	351	351	357
353	42,86	280,0000-400,00	356	355	355	355	355	355	342
362	42,86	280,0000-400,00	356	356	357	356	356	356	332
350	42,86	280,0000-400,00	352	352	352	353	352	353	342
372	42,86	280,0000-400,00	353	353	351	352	352	352	362
351	42,86	280,0000-400,00	353	353	351	352	352	352	362
348	42,86	280,0000-400,00	351	351	349	350	350	350	352
362	42,86	280,0000-400,00	352	352	352	352	352	352	352
366	42,86	280,0000-400,00	360	359	361	359	360	359	339
366	42,86	280,0000-400,00	360	359	361	359	360	359	340
366	42,86	280,0000-400,00	353	353	352	353	353	353	347
378	42,86	280,0000-400,00	353	353	352	353	353	353	347
351	42,86	280,0000-400,00	361	361	362	360	361	361	344
349	42,86	280,0000-400,00	361	361	362	360	361	361	344
341	42,86	280,0000-400,00	360	359	360	359	359	359	344
356	42,86	280,0000-400,00	350	349	351	350	351	350	349

3.1.8 Escolha do melhor modelo teórico para prever a dureza Brinell do aço SAE 52100

Essa foi a última etapa da metodologia e foi nela que ocorreram os resultados deste presente trabalho. Apesar de essa ser uma etapa da metodologia, ela será comentada no Capítulo 4, já que contém os resultados finais deste estudo.

3.2 Materiais utilizados

3.2.1 Aço SAE 52100

Conforme já comentado, o aço SAE 52100 é o utilizado neste presente trabalho. Outros nomes que recebe, dependendo da norma para sua nomenclatura, é DIN 100Cr6, ou pela AISI, E52100.

A Tabela 3.3 indica a composição química nominal em % em massa do aço SAE 52100.

Tabela 3.3 Composição química nominal em % em massa do aço SAE 52100. Fonte: Adaptado de SAE J404.

Composição Química do Aço SAE 52100									
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V
Mínimo	0,98	0,25	0,025	0,025	0,15	-	1,30	-	-
Máximo	1,10	0,45	0,025	0,025	0,35	-	1,60	-	-

Foram preparadas 3 amostras de diferentes bitolas para se verificar a microestrutura do produto deste estudo. As amostras foram preparadas com lixas de 400 grãos/mm² e 1200 grãos/mm² e, em seguida, polidas com pastas de diamante de 3 e 1 µm, nessa ordem. Após essa etapa, as amostras foram atacadas com o reativo Nital 2% (solução composta por 2 ml de ácido nítrico e de 99 a 95 ml de álcool etílico) durante 8 segundos. Em seguida, foram lavadas com água e álcool e secadas no secador de amostras para, então, serem observadas no microscópio óptico da empresa. A Figura 3.14 ilustra as amostras já cortadas, lixadas, polidas e atacadas, passo que antecede a análise da microestrutura.

As microestruturas obtidas podem ser visualizadas na Figura 4.2 (A), (B) e (C) no Capítulo 4 – Resultados e Discussão.

O microscópio óptico utilizado para as análises pode ser verificado na Figura 3.15.

Figura 3.14 Amostras do aço SAE 52100 preparadas (lixadas, polidas e atacadas), prontas para análise.



Figura 3.15 Microscópio óptico utilizado para observação da microestrutura de amostras de aço.



Detalhes sobre o ensaio de dureza Brinell do aço SAE 52100, verificar no subcapítulo a seguir, 3.4, deste Trabalho de Diplomação.

3.2.2 Equipamentos utilizados para gerar resultados de composição química e dureza brinell

Para a composição química da prova final do aço SAE 52100, que é o resultado que fica registrado no sistema interno da empresa, foram utilizados 2 equipamentos: um espectrômetro de emissão ótica e um medidor simultâneo de Carbono e Enxofre. Já para os resultados de dureza Brinell, foi utilizado 1 equipamento, o durômetro Wolpert Dia Testor 2N.

O equipamento espectrômetro de emissão ótica, modelo ARL 4460, realiza a queima num ponto da amostra de aço já solidificada, esta que vem de uma amostragem retirada da etapa final de produção do aço, do Lingotamento, e enviada para o Laoratório

Químico através de um correio pneumático. Primeiro, a amostra de aço é lixada em lixadeira automática, para que a superfície se torne adequada para, então, receber a queima. Após a queima da amostra no equipamento, a transmissão do resultado da composição química ocorre de forma online para o sistema, sendo possível sua visualização na Aciaria instantaneamente, para que verifiquem se está dentro dos limites especificados pelo cliente. Isso ocorre em, aproximadamente, 4 minutos. Na verdade, ocorrem amostragens durante todo o processo de produção do aço na Aciaria, e são enviadas provas de escória e aço ao Laboratório Químico para que sejam realizados ajustes da composição química durante o processo. A produção de aço somente segue para a etapa seguinte quando os limites de composição química de cada etapa estiverem aceitáveis. Caso necessário, o pessoal da Aciaria realiza ajustes para corrigir a composição química e, então, são realizadas novas amostragens. Porém, o presente trabalho vai se ater a comentar apenas a prova final do aço, etapa esta que gerou os resultados envolvidos nos dados históricos obtidos e nos dados de 2016 para a validação dos modelos teóricos.

Ainda sobre a análise da composição química do aço SAE 52100, a prova final necessita ser verificada num segundo equipamento, um medidor simultâneo de Carbono e Enxofre, modelo LECO CS 230. A necessidade de utilizar esse equipamento é devido a maior precisão do teor de Carbono durante a queima da amostra. A mesma prova de aço que é lixada para ter sua composição química revelada no equipamento de emissão ótica, é utilizada no LECO CS 230, porém, antes de ser lixada, é retirada uma amostragem de cavaco, se adequando, desta forma, para ser utilizada no LECO CS 230.

As Figuras 3.16 e 3.17 ilustram, respectivamente, o equipamento ARL 4460 e o LECO CS 230.

Figura 3.16 Espectrômetro de Emissão Ótica ARL 4460, utilizado para análise da composição química do aço SAE 52100.



Figura 3.17 Medidor simultâneo de Carbono e Enxofre LECO CS 230, utilizado para análise do teor de Carbono e Enxofre do aço SAE 52100.



O equipamento utilizado para obtenção dos resultados de dureza Brinell do aço SAE 52100, tanto impressão da esfera no corpo de prova, quanto a leitura e transmissão, é o durômetro da marca e modelo Wolpert Dias Testor 2N, conforme ilustrado na Figura 3.18.

Figura 3.18 Durômetro Wolpert Dia Testor 2N, utilizado no ensaio de dureza Brinell do aço SAE 52100.



Mais detalhes do ensaio de dureza serão discutidos no subcapítulo seguinte, inclusive fotos de corpos de prova para a realização do ensaio.

3.2.3 Softwares utilizados

O software estatístico utilizado para formular a equação de dureza Brinell, Modelo 7, pelo método de regressão linear múltipla, é o Minitab – versão Release 14.12.0. A exigência mínima para o seu funcionamento no sistema Windows é: Windows XP/Vista/7/8/10, com 32 bits.

O software foi criado em 1972 e inicialmente era utilizado em aulas de estatística da “Pennsylvania State University”. Porém, atualmente, seu uso é muito amplo, podendo ser aplicado a estudos em diversas áreas que envolvam análises estatísticas. Algumas de suas funcionalidades estão listadas a seguir (SILVA da, 2006):

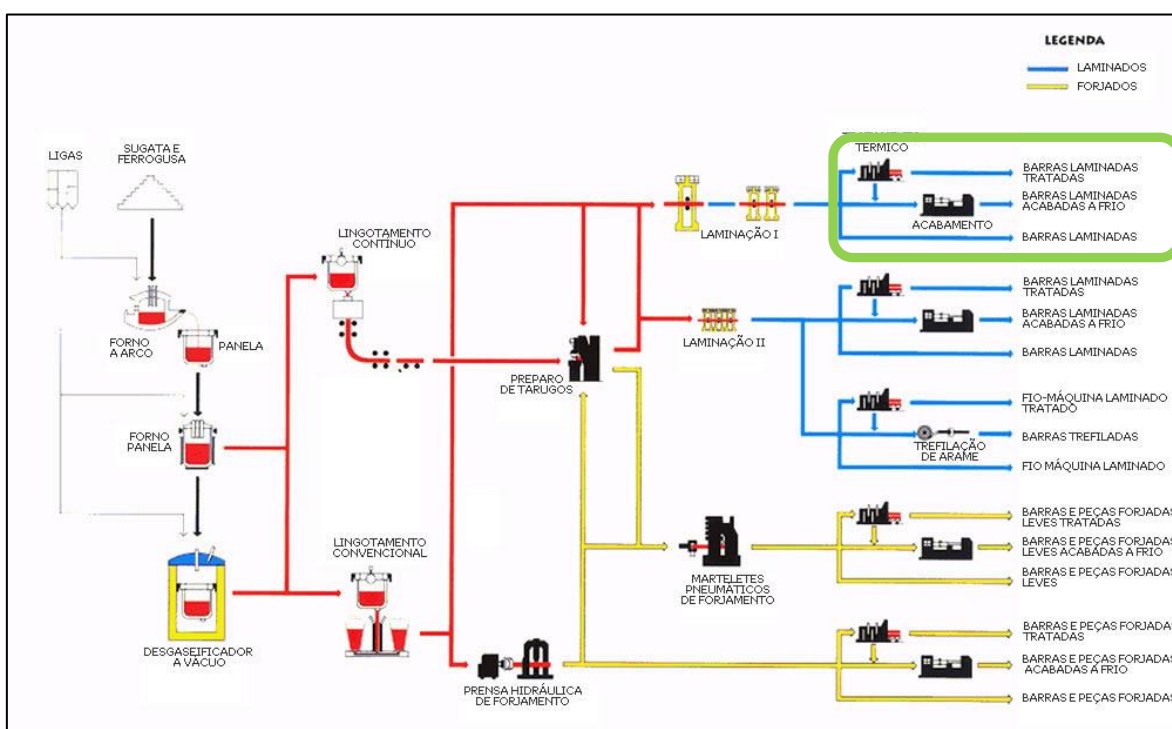
- Estatística básica e avançada;
- Regressão e ANOVA;
- Séries temporais;
- Cartas de Controle;
- Gráficos novos e otimizados com qualidade para apresentação;
- Simulações e distribuições;
- Importação, exportação e manipulação flexíveis de dados;
- Avaliação dos Sistemas de Medição (Gage R&R);
- Controle Estatístico de Processos (CEP);
- Planejamento de Experimentos (DOE);
- Análise de Confiabilidade;
- Análise Multivariada;
- Análise de Capacidade;
- Tamanho de amostra e cálculos de poder.

A versão do Excel utilizada foi a do Pacote Office 2016.

3.3 Amostragem

Atualmente, há 11 pontos de coleta de amostra na Usina que enviam amostras para o Laboratório Metalúrgico, dentre eles: pontos na área de Laminação, de Tratamento Térmico, da Aciaria, da Forjaria e das Linhas de Inspeção. Porém, para o presente estudo, a amostragem é retirada apenas dos pontos que envolvem a produção de barras laminadas redondas, sem tratamento térmico, do aço SAE 52100, reduzindo esse número de pontos de coleta. A Figura 3.19 mostra o fluxograma de produção do aço da empresa e a parte circutada em verde representa de onde são retiradas amostras para esse estudo e enviadas ao Laboratório Metalúrgico, onde são realizados os mais diversos ensaios metalúrgicos e mecânicos.

Figura 3.19 Fluxograma do processo de produção da Gerdau Aços Especiais Piratini (Charqueadas).



Fonte: Adaptado de Fonte interna Gerdau.

A amostragem é realizada de forma a garantir a representatividade do lote em questão e, muitas vezes, segue requisitos previstos em normas específicas com o cliente.

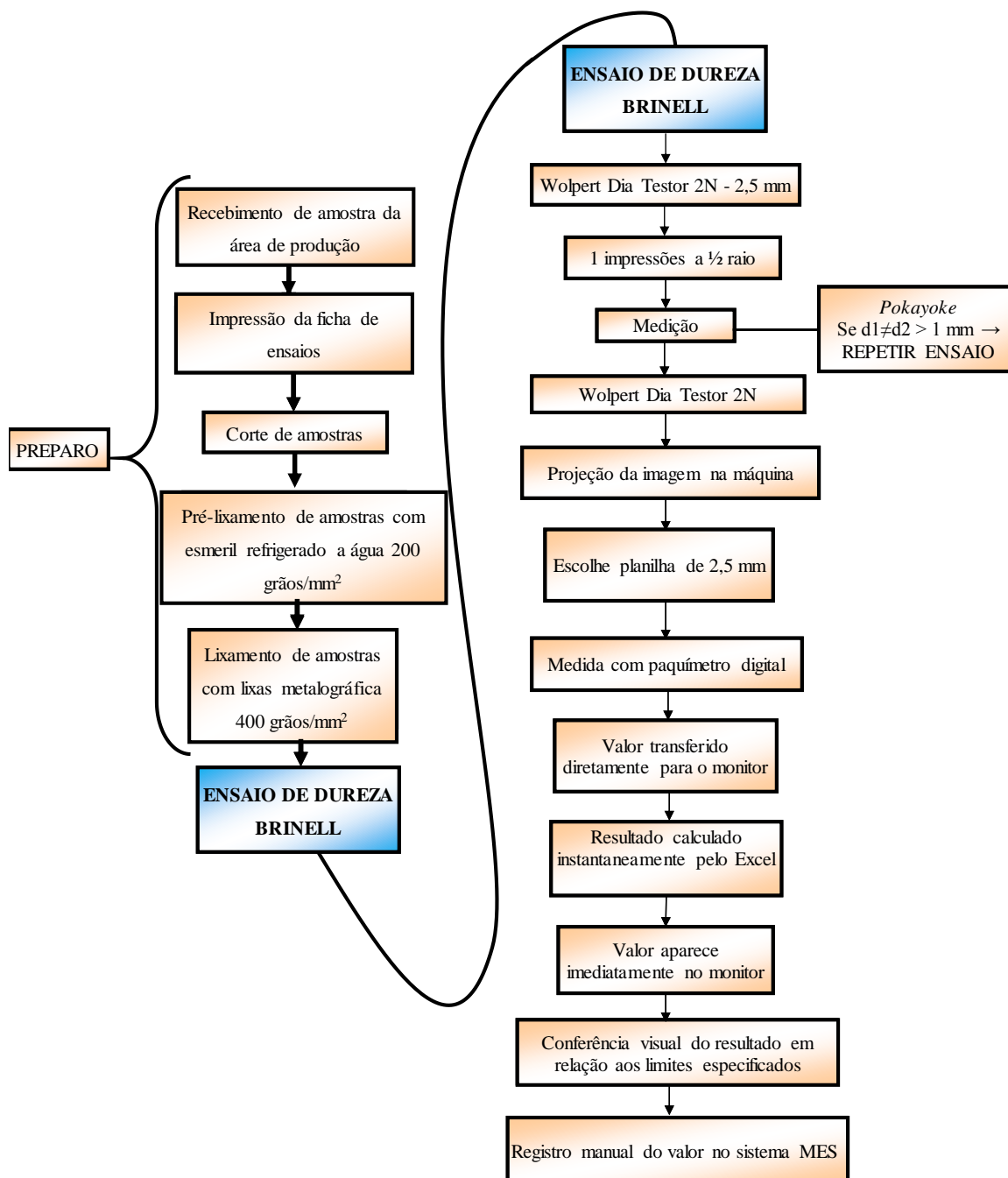
3.4 O Ensaio de dureza Brinell

No Laboratório Metalúrgico, há diferentes durômetros para os diferentes ensaios de dureza: dureza Brinell, dureza Vickers e microdureza. Conforme a bitola da amostra de aço

(mesmo tamanho do produto produzido), há diferentes procedimentos de corte e preparo que antecedem os ensaios de dureza. Porém, para o aço SAE 52100, o corte é realizado de duas maneiras, pois as bitolas geralmente variam de 28,58 mm até 57,15 mm: ou é cortada a seção inteira de uma amostra que chegou ao laboratório, ou é cortada um quarto da seção, para que a impressão do durômetro alcance no local correto do corpo de prova no momento do ensaio. Para esse caso, os ensaios de dureza Brinell são todos realizados no durômetro já mencionado neste trabalho, o Wolpert Dia Testor 2N (ver Figura 3.18).

O fluxograma da Figura 3.20 representa o passo a passo para realização do preparo dos corpos de prova e do ensaio de dureza Brinell utilizados neste Trabalho de Diplomação.

Figura 3.20 Fluxograma das etapas de preparo dos corpos de prova e das etapas do ensaio de dureza Brinell.



O corte dos corpos de prova é realizado conforme a bitola, e está representado na Tabela 3.4. Para as bitolas dessa qualidade de aço, em que a menor é de 28,58 mm, não é necessário realizar o embutimento.

Tabela 3.4 Tamanhos de seção para o corte dos corpos de prova para o ensaio de dureza Brinell.

CORTE DE CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE DUREZA BRINELL		
Até 30 mm	De 30 a 40 mm	Acima de 40 mm
Toda a seção	½ da seção	¼ da seção ou 30 x 30 mm

O ensaio de dureza Brinell neste equipamento é realizado através da impressão de uma esfera de 2,5 mm, a ½ raio e com carga de 187,5 kgf. Figura 3.21 ilustra o ensaio de dureza sendo realizado no corpo de prova e a Figura 3.22 ilustra uma foto de corpos de prova para o ensaio de dureza Brinell.

Figura 3.21 Ensaio de dureza Brinell no Wolpert Dia Testor 2N, com esfera de 2,5 mm e carga de 187,5 kgf sendo impressa a ½ raio da amostra.



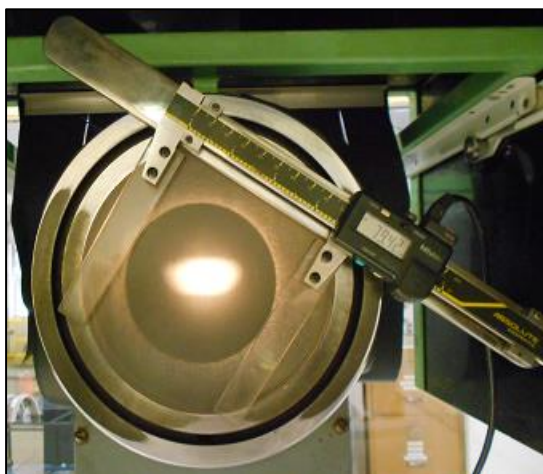
Fonte: Fonte interna Gerdau.

Figura 3.22 Corpos de prova preparados para o ensaio de dureza Brinell, já realizada a impressão em alguns deles.



A leitura das diagonais é realizada no próprio durômetro, conforme ilustrado na Figura 3.23. A segurança da transferência dos resultados e recursos para garantir a qualidade dos dados já foi discutida no subcapítulo 3.14.

Figura 3.23 Leitura das diagonais do ensaio de dureza Brinell no Wolpert Dia Testor 2N.



Font: Fonte interna Gerdau.

Efetuada a leitura das diagonais, o valor é transferido automaticamente do paquímetro digital para a planilha em Excel, que calcula automaticamente o valor da dureza Brinell. Caso o valor das diagonais diferirem mais de 1 mm entre si, surge o *Pokayoke* que avisa para repetir o ensaio. Dado o resultado de dureza Brinell, o operador confere os limites especificados e lança o resultado manualmente no sistema interno, MES, conferindo visualmente os limites de especificação. Caso o resultado fique fora desses limites, a engenharia é acionada automaticamente pelo sistema para verificar as ações a serem tomadas, como por exemplo, possível negociação com cliente, sucatear o lote, ou desviar o material.

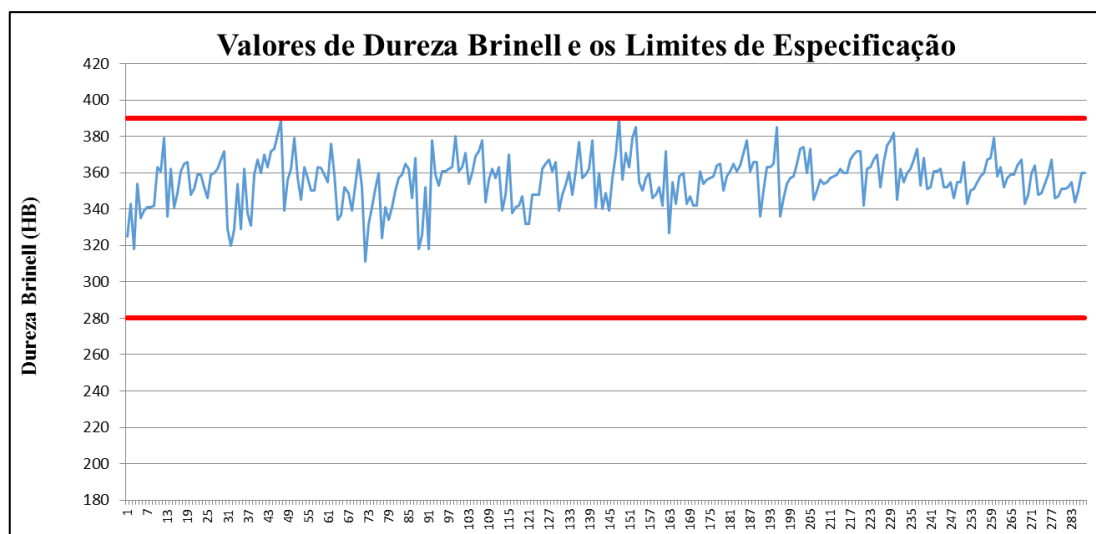
4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e discussão, a seguir, estão baseados nos objetivos específicos citados no Capítulo 1 - Introdução, bem como em alguns passos realizados na metodologia.

4.1 Estabilidade dos resultados históricos de dureza Brinell

O primeiro resultado obtido foi referente a uma análise dos dados históricos de dureza Brinell, que foram utilizados para modelar cada um dos 7 modelos teóricos obtidos. Através do gráfico, na Figura 4.1, pode-se verificar os resultados de dureza Brinell do aço SAE 52100, obtidos de 2012 a 2015, plotados em azul, bem como os valores dos limites de especificação, 280 HB e 390 HB (valor mínimo e valor máximo permitidos, respectivamente), plotados em vermelho. Observa-se que nenhum dos resultados utilizados para modelamento das equações esteve fora desse intervalo permitido. Desta forma, os resultados são estáveis, permitindo o estudo de dureza Brinell teórica para esta qualidade de aço e este produto. Os valores de dureza Brinell obtidos também estão de acordo com os valores previstos na literatura para esse aço, que é laminado e sem tratamento térmico.

Figura 4.1 Gráfico dos 283 resultados históricos de dureza Brinell, obtidos no período de 2012 a 2015, plotados em azul e os limites de especificação aceitáveis, inferior (280 HB) e superior (390 HB), plotados em vermelho.



4.2 Confiabilidade dos dados de dureza Brinell

Este subcapítulo apresenta os resultados da confiabilidade tanto dos dados históricos de dureza Brinell (de 2012 a 2015) quanto dos dados utilizados para validação dos modelos (de 2016). A confiabilidade é satisfatória, uma vez que há vários recursos que são utilizados para garantir a qualidade dos resultados gerados pelo durômetro Wolpert Dia Testor 2N. A seguir, estão listados de forma resumida:

- Calibração do equipamento durômetro Wolpert Dia Testor 2N efetuada periodicamente em laboratórios cadastrados na RBC (Rede Brasileira de Calibração);
- Uso periódico de padrões primários;
- Realização do estudo de MSA (Análise do Sistema de Medição): estudo de R&R – Reprodutibilidade e Representatividade, o qual exige que os operadores sigam os procedimentos operacionais e que as peças sejam representativas da variabilidade natural do processo;
- Sistema de medição automático das diagonais da impressão durante o ensaio de dureza;
- *Pokayoke* para as medições das diagonais.

Portanto, a confiabilidade dos resultados de dureza Brinell é, relativamente, muito boa.

4.3 Metalografia representativa das amostras do aço SAE52100 sem tratamento térmico

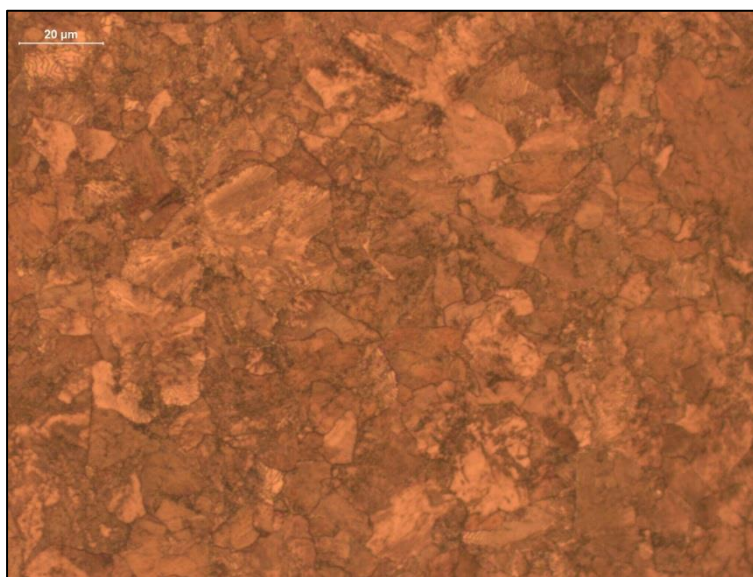
Conforme esperado, a microestrutura de um produto laminado e sem tratamento térmico desse aço é composta de perlita com cementita no contorno de grão (contorno da

austenita, anterior ao momento em que a temperatura atinge a composição eutetóide). As Figuras 4.2.A, 4.2.B e 4.2.C ilustram a microestrutura de uma barra laminada sem tratamento térmico, do aço SAE 52100, de bitolas 28,58 mm, 36,51 mm e 50,8 mm, respectivamente, com aumento de 500 vezes. A cementita pode ser observada nos contornos de grão, com cor mais clara, nas 3 figuras citadas. Já a perlita aparece em diferentes tons de marrom, sendo possível a visualização de suas lamelas mais grosseiras em alguns locais específicos, regiões essas de cor marrom mais clara. Os corpos de prova para essas 3 análises representativas foram preparados conforme descrito no subcapítulo 3.2.1 da Metodologia.

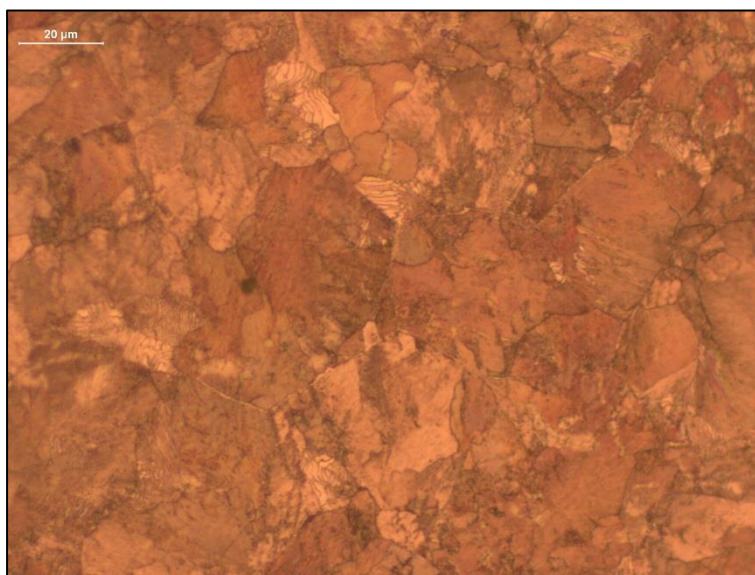
O objetivo dessas 3 amostras representativas da microestrutura é observar que a microestrutura é estável nesse produto desta qualidade de aço, formando sempre perlita com cementita, independente da bitola.

Figura 4.2 Microestruturas do aço SAE 52100, constituídas por perlita e cementita nos contornos de grão, referentes às bitolas (A) 28,58 mm, (B) 36,51 mm e (C) 50,8 mm.

(A)



(B)



(C)



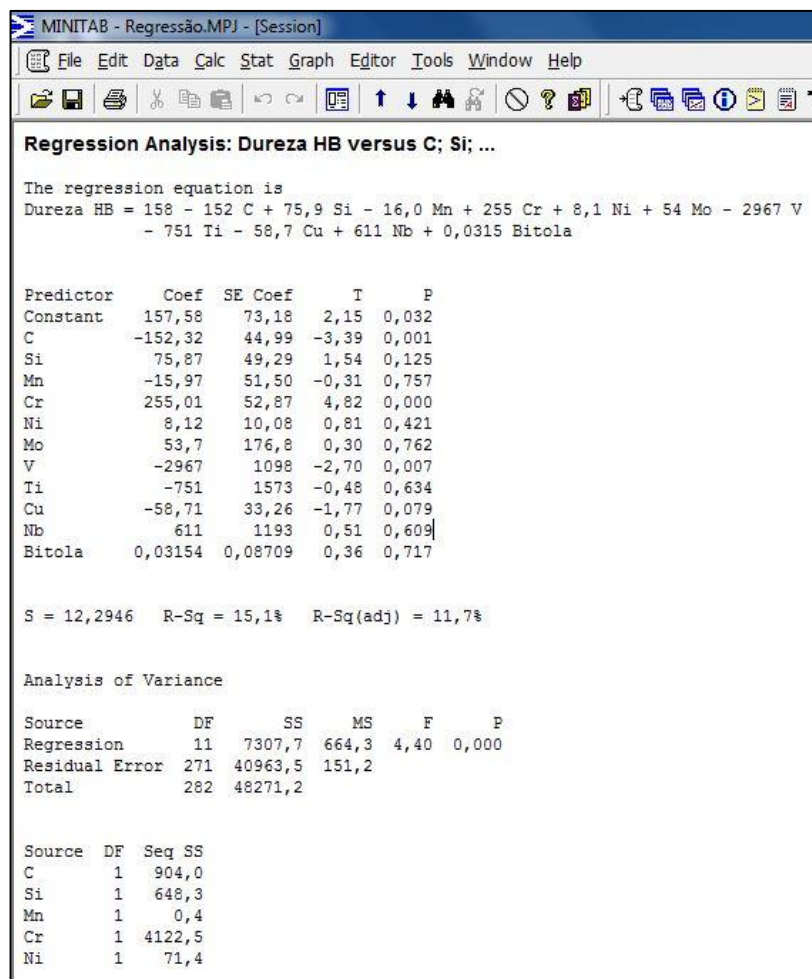
4.4 Modelos teóricos obtidos

4.4.1 Influência da bitola nos valores de dureza

Conforme equação que se pretendeu formar a partir de uma regressão linear múltipla, com o uso do software MiniTab, a fim de formar o modelo teórico 7, gerou-se uma tabela que indicava o valor de p (P-value). Este valor, por sua vez, explicava a relação entre duas variáveis, no caso, bitola e dureza Brinell. Para valores altos de p , isto é, valores de p maiores que 0,05, significava que as variáveis não tinham relação estatisticamente.

Portanto, com um “P-value” igual a 0,717, conforme é possível visualizar na Figura 4.3, a bitola não interfere estatisticamente no valor da dureza.

Figura 4.3 Representação da equação gerada por regressão linear múltipla, considerando a bitola como sendo uma das variáveis, juntamente com os elementos químicos. Valor de p da bitola igual a 0,717. Imagem retirada do Minitab.



Além disso, também não há influência significativa em termos metalúrgicos, uma vez que a microestrutura se mantém constante (perlita com cementita nos contornos de grão), bem como a composição química. Por não conter tratamento térmico no produto deste aço analisado, ou seja, o resfriamento é de forma lenta, as diferenças entre as bitolas não são suficientemente grandes para gerar modificações na microestrutura se comparadas umas com as outras.

Conforme mencionado no Capítulo 3 – Metodologia, esse resultado direcionou para que fosse preciso apenas modelos teóricos de dureza Brinell para todas as bitolas, não sendo

necessário agrupá-las em intervalos de bitolas para obtenção de modelos para cada um desses intervalos.

4.4.2 Modelos obtidos e suas validações

Modelos obtidos

Segundo a literatura e as considerações da qualidade de aço deste Trabalho de Diplomação, resultou-se em utilizar as 6 fórmulas de carbono equivalente, conforme listados na Tabela 2.8. A partir dessas 6 fórmulas de carbono equivalente, foram obtidos 6 modelos, conforme listados na Tabela 3.2. Os modelos teóricos pelo método do carbono equivalente são satisfatórios para representar valores de dureza Brinell da qualidade de aço SAE 52100.

Já para a obtenção do modelo teórico via regressão linear múltipla, com o auxílio do Minitab, também foi gerada uma equação – modelo teórico 7, na Tabela 3.2. Porém, ao se gerar essa equação, conforme foi comentado no Capítulo 3, o programa gera valores de p , o qual representa a relação de cada um dos elementos químicos com os valores de dureza Brinell. Além disso, o programa gera o valor de R^2 , que significa o quanto o modelo contruído é explicado utilizando as variáveis, no caso, elementos químicos (os mesmo das fórmulas de carbono equivalente: C, V, Mo, Mn, Nb, Ti, Cr, Ni, Si e Cu; B não foi utilizado, pois seu valor é igual a zero, não há B nesta qualidade de aço).

Os valores de p para todos os elementos químicos foram muito altos (maiores que 0,05) com exceção do C e do Cr. Estatisticamente, significa que os elementos químicos não influenciam na dureza do aço. Afirmação esta, que não possui sentido metalúrgico, pois, sabe-se que os elementos químicos influenciam sim na dureza do aço e nas demais propriedades, conforme discutido no Capítulo 2 – Revisão da Literatura. Portanto, não faz sentido utilizar uma equação de regressão linear múltipla para uma única qualidade de aço, já que o programa, ao realizar esse tipo de formulação, leva em consideração a variabilidade entre os valores de C, a variabilidade entre os valores de Nb, a variabilidade dos valores de Cr, e por aí vai. Logo, não faz sentido utilizar uma formulação por regressão linear múltipla para apenas uma qualidade de aço e, sim, faria sentido utilizá-la para diversas qualidades de aço, pois desta forma, o programa reconheceria a variabilidade entre resultados de C, Nb, Si, Cr, etc. Quanto ao valor de R^2 ser extremamente baixo, igual a 12%, significa que apenas 12% do modelo gerado é explicado pelas variáveis (elementos químicos).

Portanto, este modelo teórico 7 não é satisfatório para representar a dureza Brinell de apenas uma qualidade de aço. No entanto, mostra uma estabilidade desejada na composição química do aço.

Validação dos modelos e escolha do melhor

Mesmo com os valores de p individuais serem altos (informando que não há relação do elemento químico com a dureza Brinell) e o valor de R^2 ser extremamente baixo, o modelo foi utilizado para verificar quais os valores de dureza Brinell seriam gerados, para, então, poder verificar se os resultados seriam próximos aos de dureza Prática Brinell. Já que esses valores informam apenas conclusões estatísticas, não considerando o conhecimento metalúrgico.

Foi gerada uma tabela no software Excel - complementando a tabela já existente com os valores de dureza Brinell geradas por cada um dos modelos - com colunas informando a diferença entre os valores obtidos por cada um dos 7 modelos e os valores de dureza Brinell Prática. Como os resultados gerados pelos modelos via carbono equivalente são praticamente iguais, variando no máximo 2 HB, aplicou-se um cálculo do percentual de resultados ao modelo CEWM, ou Modelo 1, a fim de se verificar quantos valores estavam com essa diferença menor que 7 HB, ou seja, os valores gerados pelos modelos muito próximos do valor real de dureza Prática. Esse resultado foi replicado aos demais modelos via carbono equivalente, pois os percentuais variavam em menos de 1% entre eles. Fez-se, de forma separada, o mesmo para o modelo via regressão linear múltipla, pois esse gerou resultados visivelmente diferentes em relação aos gerados pelos outros 6 modelos. O resultado pode ser verificado na Figura 4.4.

Figura 4.4 Resultados da quantidade de diferenças menores que 7 HB (entre valores de dureza Brinell Prática e valores gerados via modelos).

Modelos pelo Carbono Equivalente		
$\Delta \leq 7 $ HB	43%	104
$\Delta > 7 $ HB	57%	140
Total	100%	244

Modelo pela R.L.M.		
$\Delta \leq 7 $ HB	35%	86
$\Delta > 7 $ HB	65%	158
Total	100%	244

O valor de 7 HB foi definido a partir do erro permitido pela Norma NBR ISO NM 6506-2:2010: Materiais Metálicos – Ensaio de Dureza Brinell, que é $\pm 2\%$ do valor da dureza Brinell. 7 HB é referente ao valor de 2% da maioria dos resultados de dureza Brinell. Logicamente, a norma foi aplicada apenas para as diferenças maiores que 7 HB em módulo, afinal, as diferenças que estavam abaixo desse valor estavam ótimas para o estudo. A tabela retirada da Norma pode ser visualizada na Figura 4.5.

Figura 4.5 Representação da repetitividade e erro da máquina de ensaio, para dureza Brinell.

Dureza del bloque patrón / Dureza do bloco de referência HBW	Repetibilidad admisible r_{rel} , de la máquina de ensayo / Repetitividade admissível r_{rel} , da máquina de ensaio %	Error admisible, E_{rel} , de la máquina de ensayo / Erro admissível, E_{rel} , da máquina de ensaio % de H
≤ 125	3,0	$\pm 3,0$
$125 < HBW \leq 225$	2,5	$\pm 2,5$
> 225	2,0	$\pm 2,0$

HBW: Dureza Brinell.

Fonte: Norma NBR ISO NM 6506-2:2010: Materiais Metálicos – Ensaio de Dureza Brinell.

Além do Modelo 7 – via regressão linear múltipla – não fazer sentido estatisticamente, ele foi o que apresentou menor percentual de diferença de resultados abaixo de 7 HB. Ainda, foi o modelo que apresentou as maiores diferenças entre os valores gerados e os valores de dureza Práticos. Portanto, seria o pior modelo.

Os 6 modelos teóricos via equações de carbono equivalente foram os que apresentaram maior quantidade de diferença de resultados abaixo de 7 HB, representando 43% dos 244 resultados de cada modelo. Os resultados gerados por esses 6 modelos, inclusive as diferenças entre modelo e valor Prático de dureza, foram extremamente próximos, variando, no máximo, 2 HB.

Uma figura representativa dessas diferenças, inclusive da diferença considerando a Norma BR ISSO NM 6506-2:2010, pode ser verificada na Figura 4.6, retirada da tabela geral disposta no software Excel.

Figura 4.6 Figura representativa retirada da tabela original, disposta no software Excel, ilustrando as colunas de cálculos de diferenças entre resultados via modelos e resultados de dureza Prática, bem como diferenças permitidas via Norma NBR ISO NM 6506-2:2010.

Dureza Prática em HB	Bitola	Erro permitido da Dureza Brinell pela NORMA ($\pm 2\%$)	Limite de Escepe.	Modelo CEWM	Diferença 1	Diferença com a Norma1	Modelo AWS D1.1	Diferença 2	Modelo Stout and Doty	Diferença 3
359	42,86	7	280,0000-400,00	358	1	não se aplica	358	1	357	2
355	42,86	7	280,0000-400,00	355	0	não se aplica	355	0	354	1
363	42,86	7	280,0000-400,00	355	8	1	355	8	354	9
358	42,86	7	280,0000-400,00	355	3	não se aplica	355	3	354	4
362	42,86	7	280,0000-400,00	352	10	3	352	10	351	11
366	42,86	7	280,0000-400,00	352	14	7	352	14	351	15
373	42,86	7	280,0000-400,00	352	21	14	352	21	351	22
370	42,86	7	280,0000-400,00	353	17	9	353	17	353	17
368	42,86	7	280,0000-400,00	354	14	7	354	14	354	14
351	42,86	7	280,0000-400,00	360	-9	-2	359	-8	359	-8
362	42,86	7	280,0000-400,00	358	4	não se aplica	357	5	357	5
345	42,86	7	280,0000-400,00	358	-13	-6	357	-12	357	-12
354	42,86	7	280,0000-400,00	356	-2	não se aplica	355	-1	355	-1
352	42,86	7	280,0000-400,00	356	-4	não se aplica	355	-3	355	-3
355	42,86	7	280,0000-400,00	362	-7	não se aplica	362	-7	362	-7
360	42,86	7	280,0000-400,00	362	-2	não se aplica	362	-2	362	-2
347	42,86	7	280,0000-400,00	357	-10	-3	357	-10	357	-10
364	42,86	7	280,0000-400,00	357	7	não se aplica	357	7	357	7
350	42,86	7	280,0000-400,00	351	-1	não se aplica	351	-1	350	0
353	42,86	7	280,0000-400,00	356	-3	não se aplica	355	-2	355	-2
362	42,86	7	280,0000-400,00	356	6	não se aplica	356	6	357	5
350	42,86	7	280,0000-400,00	352	-2	não se aplica	352	-2	352	-2
372	42,86	7	280,0000-400,00	353	19	12	353	19	351	21
351	42,86	7	280,0000-400,00	353	-2	não se aplica	353	-2	351	0
348	42,86	7	280,0000-400,00	351	-3	não se aplica	351	-3	349	-1
362	42,86	7	280,0000-400,00	352	10	2	352	10	352	10
366	42,86	7	280,0000-400,00	360	6	não se aplica	359	7	361	5
366	42,86	7	280,0000-400,00	360	6	não se aplica	359	7	361	5

As colunas “Diferença 1”, “Diferença 2”, ..., representam a diferença dos valores gerados via modelos e dureza Brinell Prática (na primeira coluna, a esquerda) em relação aos valores de dureza Brinell Práticos (valores reais de dureza). A coluna “Erro permitido da Dureza Brinell pela NORMA” é o quanto vale 2% em módulo do valor da Dureza Prática em HB (coluna 1), que é praticamente igual a $|7|$ HB para todas as linhas. A coluna “Diferença com a Norma 1”, acrescenta ou diminui 7 HB dos valores “Diferença 1”, cálculo aplicado apenas quando essa diferença fosse maior que 7 HB em módulo. Já as colunas “Modelo CEWM” e “Modelo AWS D1.1” representam os valores de dureza calculados pelos respectivos modelos teóricos. Os demais também foram calculados, porém, as dimensões da tabela serem enormes, utilizou-se apenas uma representação para que se pudesse ilustrar uma parte, mas o raciocínio é o mesmo nas colunas mais a direita, que não aparecem na Figura 4.5.

A maior diferença entre os valores de dureza via modelos pelo carbono equivalente e o valor de dureza Brinell Prática é $|44|$ HB sem considerar a Norma. Considerando os 7 HB de erro admitido pela Norma mencionada, a maior diferença é $|37|$ HB. Já para o modelo via regressão linear múltipla, a maior diferença foi de $|54|$ HB e, considerando a Norma, foi de $|46|$ HB.

É importante salientar que mesmo a maioria das diferenças entre resultados de dureza gerados via carbono equivalente e dureza Prática serem maior que 7 HB (43%), menos da metade, que se pode ver como um ponto negativo, nenhum dos valores via modelos ficou fora dos limites especificados – de 280 HB a 390 HB. Até mesmo aqueles gerados pelo modelo via regressão linear múltipla.

Embora os modelos via carbono equivalente sejam extremamente parecidos, elegeu-se o melhor modelo, o Modelo CEWM. Essa escolha foi devido ao estudo de TALAS, 2009, em que a fórmula de carbono equivalente foi a que melhor representou a dureza em relação a outras propriedades, dentre uma análise de várias fórmulas de carbono equivalente.

5.0 CONCLUSÕES

As conclusões aqui expostas são um resumo do Capítulo 4 – Resultados e Discussão, bem como uma conclusão referente a meta estabelecida no início deste trabalho, que era um ganho em produtividade a partir de modelos teóricos que prevejam valores de dureza Brinell. São elas:

Modelos via carbono equivalente são aceitáveis para prever a dureza Brinell das bitolas 28,58 mm, 33,34 mm, 30,16 mm, 36,51 mm, 42,86 mm, 44,45 mm, 50 mm, 50,8 mm, 57,15 mm, 57,15 mm e 60,33 mm, do aço SAE 52100, de barras redondas laminadas e sem tratamento térmico. Se implantado, a estimativa de ganho em produtividade é de 134 horas anuais – considerando uma teórica eliminação de ensaio prático.

As diferentes bitolas não interferem, estatisticamente e metalurgicamente, nos valores de dureza Brinell do aço SAE 52100, de barras redondas laminadas e sem tratamento térmico.

Os valores de dureza Brinell gerados pelo durômetro Wolpert Dia Testor 2N, utilizados tanto para dados históricos quanto para valores que validaram os modelos, são confiáveis.

Os modelos via carbono equivalente geraram valores de dureza Brinell extremamente próximos entre si, podendo ser realizada a análise em percentual de valores da diferença em relação aos valores Práticos observando apenas um dos modelos e replicando os resultados para os demais 5.

Os 6 modelos teóricos via carbono equivalente se mostraram eficazes para prever valores de dureza Brinell, possuindo 43% dos valores da diferença em relação aos valores de dureza Brinell Prática abaixo de |7| HB, seguindo a Norma NBR ISO NM 6506-2:2010.

A maior diferença entre os valores de dureza via modelos pelo carbono equivalente e o valor de dureza Brinell Prática é |44| HB. Considerando o erro admitido pela Norma NBR ISO NM 6506-2:2010, a maior diferença é |37| HB.

O modelo teórico via regressão linear múltipla não faz sentido para apenas 1 qualidade de aço, como foi realizado neste trabalho. Mesmo assim ele foi testado e apresentou apenas 35% dos valores da diferença em relação aos valores de dureza Brinell Prática abaixo de $|7|$ HB.

A maior diferença entre os valores de dureza via modelo de regressão linear múltipla e os valores de dureza Brinell Prática foi $|54|$ HB. Considerando o erro admitido pela Norma NBR ISO NM 6506-2:2010, a maior diferença é $|46|$ HB.

Todos os 7 modelos geraram valores de dureza Brinell dentro dos limites de especificação, que era de 280 HB a 390 HB, mesmo sem considerar o erro admitido pela Norma NBR ISO NM 6506-2:2010.

O melhor modelo teórico escolhido para prever valores de dureza Brinell para barras laminadas e sem tratamento térmico, do aço SAE 52100, foi o Modelo 1 (CEWM). Esse modelo utiliza a fórmula de carbono equivalente do autor TALAS e, em seu estudo, verificou-se que ela era a melhor fórmula para se prever a propriedade mecânica dureza, dentre outras várias fórmulas de carbono equivalente.

6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Verificar possibilidade de aplicar fórmulas que prevejam a dureza Brinell para outros tipos de produtos e outra qualidade de aço, inclusive, para aços com tratamento térmico.

Aplicar estudo utilizando diferentes qualidades de aço, para aplicar, então, a regressão linear múltipla, gerando um modelo teórico eficaz.

Aplicar estudo de modelo teórico a outro tipo de ensaio metalúrgico, como por exemplo, para ensaio de tração ou para ensaio de impacto.

Propor desenvolvimento de um software que unifique facilmente os dados históricos para obtenção de informações rapidamente.

7.0 REFERÊNCIAS

AST Bearings and Related Products & Services – **Resources, White Papers & Technical Information About Bearings.** <<http://www.astbearings.com/bearing-materials.html>> Acesso em 1/11/2016.

BAIN, E. C. **Functions of Alloying Elements in Steel.** American Society for Metals. Claveland, Clevenald, Ohio, U.S.A., 1939.

CARDOSO, G. F. B. M. G. **Modelamento da Temperabilidade Jominy por Regressão Linear Múltipla para Aços ao Boro.** Dissertação de Mestrado. PPGEM: UFRGS, 2011.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos.** ABM, 7ª Edição, São Paulo, 2005.

COLPAERT, H. **Metalografia dos Pordutos Siderúrgicos Comuns.** Blucher, 4ª Edição, São Paulo, 2008.

COOMAN, B. C. De.; SPEER, J. G. **Fundamentals of Steel Product Physical Metallurgy.** AISIT - Association for Iron & Steel Technology, Warrendale, U.S.A., 2012.

DEVLETIAN, J. H. **Carbon Equivalent (Pcm) Limits for Thick Carbon and Low Alloy Steels.** U.S. Department of The Navy Carderock Division, Naval Surface Warfare Center, National Shipbuilding Research Project, NSRP 0530 #7-96-3, 2000.

ESQUIVEL, A. S. et al. **Microstructure, Hardness dnd Tensile Properties of Fusion Zone In Laser Welding of Advanced High Strength Steels.** Canadian Metallurgical Quarterly, V. 51 N° 3, p.328-335. 2012.

FLINT, V; et al. **Heat Treateer’s Guide – Pratices and Procedures for Irons and Steels.** ASM International - American Society for Metals. Chandler, 2ª Edição, USA, 1995.

GLADMAN, T. **The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels.** **The Institute of Materials.** The University of Leeds, UK, 1997.

IPEM - Instituto de Pesos e Medidas do Estado de São Paulo – **Metrologia Geral, Vocabulário de Metrologia Geral.** <http://www.ipem.sp.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=363&Itemid=289> Acesso em 4/11/2016.

KASUYA, T.; HASHIBA, Y. **Carbon Equivalent to Assess Hardenability of Steel and Prediction of HAZ Hardness Distribution.** Nippon Steel Technical Report, N°. 95, p.53-61, 2007.

KASUYA, T.; YURIOKA, N. **Carbon Equivalent and Multiplying Factor for Hardenability of Steel.** 72nd Annual AWS Meeting, Welding Research Supplement, p.263-268, 1991.

KIM, K. H. et al. **Influence of Carbon Equivalent Value on the Weld Bead Bending Properties of High-Strength Low-Alloy Steel Plates.** Elsevier, Journal of Materials Science & Technology, doi.org/10.1016/j.jmst.2016.07.009, 2016.

KING, N. C de O. et al. **Produtividade sistêmica: conceitos e aplicações.** Production Journal, V.24, n.1, p.160-176, 2014.

METROTEC – **Blog.** < <http://www.metrotec.com.br/noticias>> Acesso em 15/11/2016.

MOURÃO, M. B. et al. **Introdução à Siderurgia.** ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2007.

NORMA BRASILEIRA ISO - **NBR ISO NM 6506-2:2010:** Materiais Metálicos – Ensaio de Dureza Brinell. Parte 2: Verificação e Calibração de Máquinas de Ensaio. 2010.

NORMA BRASILEIRA. **ABNT NBR 14724:** Informação e documentação – Trabalhos Acadêmicos - Apresentação. 2011.

PICKERING, F.B. **Physical Metallurgy and the Design of Steels.** Applied Science Publishers, London and New York, 1983.

REFFATTI, M. M. **Estimativa do Tamanho Máximo de Inclusão do Tipo Óxido Globular no Aço SAE 52100 através da Estatística de Valores Extremos.** Trabalho de Diplomação. DEMET: UFRGS, 2014.

SILVA da, S. B. **Determinação de Dureza Brinell em Aços Construção Mecânica de Baixo Carbono a partir de Modelos de Carbono Equivalente e Regressão Linear Múltipla.** Trabalho de Diplomação. DEMET: UFRGS, 2006.

SILVA, A. L. V. da C. e.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais.** Blucher, 3ª Edição, São Paulo, 2010.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **SAE J404:** Chemical composition of SAE alloy steels. 2000.

TALAS, S. **The Assessment of Carbon Equivalent Formulas in Predicting the Properties of Steel Weld Metals.** Elsevier, Materials and Design, p.2649-2653, 2009.

TWI – The Welding Institute – **Technical Knowledge – FAQs, Material FAQs.** <<http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/material-faqs/faq-what-is-the-difference-between-the-various-carbon-equivalent-formulae-used-in-relation-to-hydrogen-cracking/>> Acesso em 05/09/2016.