

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
CURSO DE MESTRADO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS**

NICKI ROBBERS DARCIANO CAJUEIRO DE MORAES

**INFLUÊNCIA DA TÊMPERA E REVENIDO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS
DE AÇO API 5L X65**

Rio de Janeiro

2016

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

NICKI ROBBERS DARCIANO CAJUEIRO DE MORAES

**INFLUÊNCIA DA TÊMPERA E REVENIDO NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE AÇO API 5L X65**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Ciência dos Materiais.

Orientador: Prof. Luiz Paulo Mendonça Brandão – D.C.
Coorientador: Prof. Alaelson Vieira Gomes – D.C.

Rio de Janeiro
2016

c2016

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que o poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

620.1 M827i	Moraes, Nicki Robbers Darciano Cajueiro de Influência da têmpera e revenido nas propriedades mecânicas de aço API 5L X65 / Nicki Robbers Darciano Cajueiro de Moraes; orientado por Luiz Paulo Mendonça Brandão e Alaelson Vieira Gomes - Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2016. 109p.: il. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016. 1. Curso de Ciência dos Materiais – teses e dissertações. 2. Dutos de óleo e gás. 3. Petróleo brasileiro. I. Brandão, Luiz Paulo Mendonça. II. Gomes, Alaelson Vieira. III. Título. IV. Instituto Militar de Engenharia.
----------------	--

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

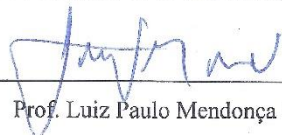
NICKI ROBBERS DARCIANO CAJUEIRO DE MORAES

INFLUÊNCIA DA TÊMPERA E REVENIDO NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE AÇO API 5L X65

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Ciência dos Materiais.

Orientador: Prof. Luiz Paulo Mendonça Brandão – D.C.

Aprovada em 30 de junho de 2016 pela seguinte Banca Examinadora:



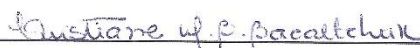
Prof. Luiz Paulo Mendonça Brandão – D.C. do IME – Presidente



Prof. Alaelson Vieira Gomes – D.C. do IME



Profª. Anderson dos Santos Paula – D.C. do IME



Profª. Cristiane Maria Basto Bacaltchuk – Ph.D. do CEFET/RJ

Rio de Janeiro

2016

AGRADECIMENTOS

À minha família pelo enorme carinho e dedicação.

Ao professor Luiz Paulo Mendonça Brandão pelos ensinamentos, profissionalismo e incentivo durante esses anos.

À Protubo pela confiança em mim depositada para desenvolvimento deste trabalho.

Ao Eng. Antônio Marcelo, M.Sc., pelo esforço e parceria para realização deste trabalho.

À Tork pela competente usinagem dos corpos de prova

Ao Laboratório de Materiais do Centro Tecnológico do Exército, ao Major André Cardoso, aos técnicos Francisco dos Santos e Vitor Santos pelo enorme apoio no desenvolvimento deste trabalho e realização dos ensaios mecânicos.

Aos professores D.C. Andersan dos Santos Paula e D.C. Alaelson Gomes pela paciência e contribuição para a conclusão deste trabalho.

Ao CEFET/RJ, em especial, à professora Ph.D. Cristiane Bacaltchuk, pela atenção e suporte na realização deste trabalho.

Aos amigos do DRX que estiveram presentes nessa caminhada.

À Grande Família, em especial: Eustáquio e Ramón pela amizade e companheirismo durante esses anos.

A todos os amigos e professores que contribuíram de alguma forma para a minha formação

À CAPES pelo suporte financeiro.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	7
LISTA DE TABELAS	13
LISTAS DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	16
LISTA DE SIGLAS	18
1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Posicionamento do Estudo	21
1.2 Objetivos	23
2 REVISÃO DA LITERATURA	24
2.1 Aços de Alta Resistência e Baixa Liga	24
2.2 Aços API	25
2.3 Processo de Curvamento por Indução	27
2.4 Características Microestruturais do Aço API 5L X65	28
2.5 Transformação por Resfriamento Contínuo	33
2.6 Tratamentos Térmicos em Aços API 5L X65	35
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
3.1 Materiais.....	39
3.2 Métodos	41
3.2.1 Tratamentos Térmicos.....	42
3.2.2 Planejamento Experimental.....	45
3.2.3 Identificação das Amostras	48
3.2.4 Ensaio de Tração.....	50
3.2.5 Ensaio de Dureza	52
3.2.6 Análise Microestrutural	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1 Ensaio de Tração.....	54
4.1.1 Fabricante A	55
4.1.1.1 Amostras Recebidas	55
4.1.1.2 Amostras Temperadas	56
4.1.1.3 Amostras Revenidas	58
4.1.2 Fabricante B	62
4.1.2.1 Amostras Recebidas	62
4.1.2.2 Amostras Temperadas	63
4.1.2.3 Amostras Revenidas	65
4.2 Ensaio de Dureza	70
4.2.1 Amostras Recebidas	72
4.2.2 Amostras Temperadas	74
4.2.3 Amostras Revenidas	75
4.3 Efeito Médio das Variáveis de Tratamento Térmico nas Propriedades Mecânicas	77

4.3.1	Fabricante A	78
4.3.2	Fabricante B	81
4.4	Modelagem Matemática das Propriedades Mecânicas.....	84
4.4.1	Limite de escoamento.....	84
4.4.2	Limite de resistência à tração	86
4.4.3	Alongamento percentual.....	88
4.4.4	Dureza Rockwell B	90
4.4.5	Avaliação das equações matemáticas.....	92
4.5	Influência da Têmpera e Revenido nas Propriedades Mecânicas	93
5	CONCLUSÕES	104
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	106
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 2.1	Economia de material devido ao uso do aço API para um determinado diâmetro do tubo (HILLENBRAND <i>et al.</i> , 2004). Adaptada	26
FIG. 2.2	Relação inversa entre resistência mecânica e tenacidade à fratura (GUIMARÃES, 1997).	27
FIG. 2.3	Modelo do processo de curvamento por indução (XUN <i>et al.</i> , 2014). Adaptada	28
FIG. 2.4	Simbologia e nomenclatura sugerida para aços ARBL (KRAUSS; THOMPSON, 1995). Adaptada.	29
FIG. 2.5	Taxa de resfriamento de 0,5°C/s. Matriz de ferrita poligonal e perlita. Aumento de 2500X (OGATA <i>et al.</i> , 2008).....	30
FIG. 2.6	Taxa de resfriamento de 1°C/s. Ferrita poligonal e lamelas finas de perlita indicada pela seta de cor azul. Aumento de 6500X (OGATA <i>et al.</i> , 2008)...	30
FIG. 2.7	Taxa de resfriamento de 5°C/s. Possível perlita indicada pela elipse. Perlita degenerada, martensita/austenita (MA), bainita indicadas, respectivamente, pelas setas de cor preta, vermelha e verde. Aumento de 6500X (OGATA <i>et al.</i> , 2008).....	31
FIG. 2.8	Taxa de resfriamento de 10°C/s. Perlita degenerada, martensita/austenita (MA), bainita indicadas, respectivamente, pelas setas de cor preta, vermelha e verde. Aumento de 8000X (OGATA <i>et al.</i> , 2008).....	31
FIG. 2.9	Taxa de resfriamento de 20°C/s. Bainita e martensita/austenita (MA) indicadas, respectivamente, pelas setas de cor preta e vermelha. Aumento de 6500X (OGATA <i>et al.</i> , 2008).	32

FIG. 2.10	Taxa de resfriamento de 30°C/s. Bainita e martensita/austenita (MA) indicadas, respectivamente, pelas setas de cor preta e vermelha. Aumento de 6500X (OGATA <i>et al.</i> , 2008).	32
FIG. 2.11	Diagramas TRC de aços para dutos em diferentes composições (BF, ferrita bainítica; AF, ferrita acicular; PF, ferrita poligonal; P, perlita) (ZHAO <i>et al.</i> , 2003).....	34
FIG. 2.12	Diagrama TRC de um aço API 5L X65 (F: ferrita, P: perlita, B: bainita e M: martensita). Os números indicam as frações volumétricas de cada constituinte (MONTE, 2013). Adaptada.....	35
FIG. 2.13	Efeito da fração volumétrica de bainita na resistência mecânica de aço API 5L X80 (ZHANG <i>et al.</i> , 2012).	37
FIG. 2.14	Efeito da fração volumétrica de bainita na ductilidade de aço API 5L X80 (ZHANG <i>et al.</i> , 2012).	38
FIG. 3.1	Fluxograma de planejamento do trabalho.	41
FIG. 3.2	Forno Combustol utilizado para os tratamentos térmicos.	42
FIG. 3.3	Curvas de aquecimento para as diferentes temperaturas de encharque. As taxas de aquecimento são, respectivamente: 200, 115 e 50°C/h.	43
FIG. 3.4	Curvas de aquecimento para as diferentes temperaturas de revenido. As taxas de aquecimento são, respectivamente: 200, 80 e 50°C/h.	43
FIG. 3.5	Representação do espaço experimental no Planejamento <i>Box-Behnken</i> (FERREIRA <i>et al.</i> , 2007). Adaptada.....	45
FIG. 3.6	Fluxograma das rotas de tratamento térmico realizadas para a têmpera e revenido.	48
FIG. 3.7	Nomenclatura das amostras recebidas.....	49
FIG. 3.8	Nomenclatura das amostras temperadas.....	49

FIG. 3.9	Nomenclatura das amostras temperadas e revenidas do Fabricante A.....	49
FIG. 3.10	Nomenclatura das amostras temperadas e revenidas do Fabricante B.....	50
FIG. 3.11	Corpos de prova de tração com seção cilíndrica, norma ASTM A370 (2014).	50
FIG. 3.12	Equipamento de ensaio de tração MTS 810 utilizado para os ensaios de propriedades mecânicas.....	51
FIG. 3.13	Descrição dos ensaios de tração por número de amostras.....	52
FIG. 3.14	Descrição dos ensaios de dureza por número de amostras.....	53
FIG. 4.1	Valores de limite de escoamento, limite de resistência à tração e alongamento percentual requisitados pela norma API 5L X65 (2012).....	55
FIG. 4.2	Limite de escoamento das amostras revenidas do Fabricante A. IC: Intervalo de confiança. Limite superior (LS) e Limite inferior (LI) da norma API 5L X65 (2012).	59
FIG. 4.3	Limite de resistência à tração das amostras revenidas do Fabricante A. IC: Intervalo de confiança. Limite superior (LS) e Limite inferior (LI) da norma API 5L X65 (2012).	60
FIG. 4.4	Alongamento percentual das amostras revenidas do Fabricante A. IC: Intervalo de confiança. Limite inferior (LI) da norma API 5L X65 (2012).....	62
FIG. 4.5	Limite de escoamento das amostras revenidas do Fabricante B. IC: Intervalo de confiança. Limite superior (LS) e Limite inferior (LI) da norma API 5L X65 (2012).	66
FIG. 4.6	Limite de resistência à tração das amostras revenidas do Fabricante B. IC: Intervalo de confiança. Limite superior (LS) e Limite inferior (LI) da norma API 5L X65 (2012).	68

FIG. 4.7	Alongamento percentual das amostras revenidas do Fabricante B. IC: Intervalo de confiança. Limite inferior (LI) da norma API 5L X65 (2012).....	69
FIG. 4.8	Resultados de dureza para as amostras recebidas do Fabricante A.....	73
FIG. 4.9	Resultados de dureza para as amostras recebidas do Fabricante B.....	73
FIG. 4.10	Resultados de dureza Vickers das amostras temperadas do Fabricante A.	74
FIG. 4.11	Resultados de dureza Vickers das amostras temperadas do Fabricante B.	75
FIG. 4.12	Resultados de dureza Vickers das amostras revenidas do Fabricante A.	76
FIG. 4.13	Resultados de dureza Vickers das amostras revenidas do Fabricante B.	77
FIG. 4.14	Curva resultante do efeito médio das variáveis de tratamento térmico no limite de escoamento de amostras do Fabricante A. Temperatura de encharque (TE), Temperatura da água para resfriamento (TR), Temperatura de revenido (RE).	78
FIG. 4.15	Curva resultante do efeito médio das variáveis de tratamento térmico no limite de resistência a tração de amostras do Fabricante A. Temperatura de encharque (TE), Temperatura da água para resfriamento (TR), Temperatura de revenido (RE).	79
FIG. 4.16	Curva resultante do efeito médio das variáveis de tratamento térmico no alongamento percentual de amostras do Fabricante A. Temperatura de encharque (TE), Temperatura da água para resfriamento (TR), Temperatura de revenido (RE).	80
FIG. 4.17	Curva resultante do efeito médio das variáveis de tratamento térmico no limite de escoamento de amostras do Fabricante B Temperatura de encharque (TE), Temperatura da água para resfriamento (TR), Temperatura de revenido (RE).	81
FIG. 4.18	Curva resultante do efeito médio das variáveis de tratamento térmico no limite de resistência à tração de amostras do Fabricante B Temperatura de encharque	

	(TE), Temperatura da água para resfriamento (TR), Temperatura de revenido (RE).	82
FIG. 4.19	Curva resultante do efeito médio das variáveis de tratamento térmico no alongamento percentual de amostras do Fabricante B Temperatura de encharque (TE), Temperatura da água para resfriamento (TR), Temperatura de revenido (RE).	83
FIG. 4.20	Correlação entre valores experimentais e calculados de limite de escoamento das amostras do tubo do Fabricante A.....	85
FIG. 4.21	Correlação entre valores experimentais e calculados de limite de escoamento das amostras do tubo do Fabricante B.....	86
FIG. 4.22	Correlação entre valores experimentais e calculados de limite de resistência à tração das amostras do tubo do Fabricante A.....	87
FIG. 4.23	Correlação entre valores experimentais e calculados de limite de resistência à tração das amostras do tubo do Fabricante B.	88
FIG. 4.24	Correlação entre valores experimentais e calculados de alongamento percentual das amostras do tubo do Fabricante A.....	89
FIG. 4.25	Correlação entre valores experimentais e calculados de alongamento percentual das amostras do tubo do Fabricante B.	90
FIG. 4.26	Correlação entre valores experimentais e calculados de dureza Rockwell B das amostras do tubo do Fabricante A.....	91
FIG. 4.27	Correlação entre valores experimentais e calculados de dureza Rockwell B das amostras do tubo do Fabricante B.	92
FIG. 4.28	Micrografias das amostras recebidas dos Fabricantes A e B. Aumento de 1000X.....	94
FIG. 4.29	Micrografias das amostras temperadas dos Fabricantes A e B. Aumento de 1000X.....	95

FIG. 4.30	Gráfico de contorno para o limite de escoamento do Fabricante A para temperatura de resfriamento (TR) de 23°C.	97
FIG. 4.31	Gráfico de contorno para o limite de resistência à tração do Fabricante A para temperatura de resfriamento (TR) de 23°C.	97
FIG. 4.32	Gráfico de contorno para o alongamento percentual do Fabricante A para temperatura de resfriamento (TR) de 23°C.	98
FIG. 4.33	Micrografias de amostras revenidas do Fabricante A. Aumento de 1000X...	99
FIG. 4.34	Gráfico de contorno para o limite de escoamento do Fabricante B para temperatura de resfriamento (TR) de 23°C.	100
FIG. 4.35	Gráfico de contorno para o limite de resistência à tração do Fabricante B para temperatura de resfriamento (TR) de 23°C.	101
FIG. 4.36	Gráfico de contorno para o alongamento percentual do Fabricante B para temperatura de resfriamento (TR) de 23°C.	101
FIG. 4.37	Micrografias de amostras revenidas do Fabricante B. Aumento de 1000X.	102

LISTA DE TABELAS

TAB. 2.1	Microestrutura, tamanho médio de grão e dureza avaliadas em aço API 5L X65 em diferentes taxas de resfriamento.	29
TAB. 2.2	Composição química dos aços analisados (em peso percentual).	33
TAB. 2.3	Frações volumétricas de bainita para diferentes temperaturas de encharque.	36
TAB. 3.1	Composição química dos aços API 5L em estudo.	40
TAB. 3.3	Parâmetros de tratamentos térmicos de têmpera.	44
TAB. 3.4	Parâmetros de tratamentos térmicos de revenido.	44
TAB. 3.5	Variáveis de tratamento térmico utilizadas para o planejamento experimental.	46
TAB. 3.6	Matriz de experimentos delineadas pelo método de <i>Box-Behnken</i>	47
TAB. 3.7	Matriz das rotas de tratamento térmico delineadas pelo método de <i>Box-Behnken</i>	47
TAB. 3.8	Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração segundo a ASTM A370.	51
TAB. 4.1	Resultados das propriedades mecânicas das amostras recebidas do Fabricante A.	55
TAB. 4.2	Resultados das propriedades mecânicas das amostras temperadas a partir de 880°C do Fabricante A.	56
TAB. 4.3	Resultados das propriedades mecânicas das amostras temperadas a partir de 920°C do Fabricante A.	57

TAB. 4.4	Resultados das propriedades mecânicas das amostras temperadas a partir de 960°C do Fabricante A.	57
TAB. 4.5	Resultados do Limite de escoamento (LE) das amostras revenidas do Fabricante A.	59
TAB. 4.6	Resultados do Limite de resistência à tração (LR) das amostras revenidas do Fabricante A.	60
TAB. 4.7	Resultados do Alongamento percentual (AL) das amostras revenidas do Fabricante A.	61
TAB. 4.8	Resultados das propriedades mecânicas das amostras recebidas do Fabricante B.	63
TAB. 4.9	Resultados das propriedades mecânicas das amostras temperadas a partir de 880°C do Fabricante B.	63
TAB. 4.10	Resultados das propriedades mecânicas das amostras temperadas a partir de 920°C do Fabricante B.	64
TAB. 4.11	Resultados das propriedades mecânicas das amostras temperadas a partir de 960°C do Fabricante B.	65
TAB. 4.12	Resultados do Limite de escoamento (LE) das amostras revenidas do Fabricante B.	66
TAB. 4.13	Resultados do Limite de resistência à tração (LR) das amostras revenidas do Fabricante B.	67
TAB. 4.14	Resultados do Alongamento percentual (AL) das amostras revenidas do Fabricante B.	69
TAB. 4.15	Resultados do ensaio de dureza das amostras do Fabricante A.	71
TAB. 4.16	Resultados do ensaio de dureza das amostras do Fabricante B.	72

TAB. 4.17	Coeficientes de determinação (R^2) e de correlação (r) dos modelos matemáticos desenvolvidos.	93
-----------	--	----

LISTAS DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

AL	- Alongamento percentual
ARBL	- Aços de Alta Resistência e Baixa Liga
CE _{IIW}	- Carbono Equivalente, baseado na equação do Instituto Internacional de Soldagem
CE _{Pcm}	- Carbono Equivalente, baseado na fração química da equação de carbono equivalente de Ito-Bessyo
DOE	- Planejamento de Experimentos (<i>Design Of Experiments</i>)
ksi	- Libra força por polegada quadrada
LE	- Limite de escoamento
LR	- Limite de resistência à tração
MEV	- Microscópio Eletrônico de Varredura
PBB	- Planejamento <i>Box-Behnken</i>
PSL	Nível de Especificação do Produto (<i>Product Specification Level</i>)
RSM	- Metodologia de Superfície de Resposta (<i>Response Surface Methodology</i>)
TG	- Tamanho de grão

TRC - Transformação por Resfriamento Contínuo

SÍMBOLOS

R^2 - Coeficiente de determinação de regressão linear

r - Coeficiente de correlação

LISTA DE SIGLAS

ANP	Agência Nacional de Petróleo
API	Instituto Americano de Petróleo (<i>American Petroleum Institute</i>)
ASTM	Sociedade Americana de testes e materiais (<i>American Society for Testing and Materials</i>)
CAPES	Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior
CEFET	Centro Federal de Educação Tecnológica
IIW	Instituto Internacional de Soldagem (<i>International Institute of Welding</i>)
IME	Instituto Militar de Engenharia
ISIJ	Instituto do Japão do Ferro e do Aço (<i>Iron and Steel Institute of Japan</i>)

RESUMO

Aços de baixa liga e alta resistência (ARBL) destinados para dutos de óleo e gás devem oferecer excelente combinação entre resistência mecânica, tenacidade, ductilidade e soldabilidade. O Instituto Americano de Petróleo (API, do inglês “*American Petroleum Institute*”) normatiza os aços ARBL destinados para aplicações petrolíferas determinando os requisitos mecânicos para certificação desta classe de materiais. Neste sentido, foram analisadas a influência da têmpera e revenido no limite de escoamento, limite de resistência à tração, alongamento percentual e dureza de dois aços cujas amostras foram extraídas de dois tubos de API 5L de fabricantes distintos. Os ciclos térmicos analisados compreendem as temperaturas de encharque de 880, 920 e 960°C, da água para resfriamento em 15, 23 e 31°C e de revenido em 530, 600 e 670°C. A partir disto, foram utilizadas técnicas de planejamento experimental para redução de experimentos e otimização dos parâmetros avaliados. Para o levantamento dos dados foram realizados ensaios de tração, dureza e análise metalográfica. Além disso, modelos de regressão propostos atenderam satisfatoriamente a previsão das propriedades mecânicas em torno das variáveis de tratamento térmico. Os resultados indicam que as temperaturas de encharque de 880°C e de revenido entre 530 e 600°C foram as mais indicadas para o tratamento do Fabricante A, enquanto a temperatura de encharque 960°C é mais recomendada para ser usada no material do Fabricante B, onde a temperatura de revenido não se mostrou relevante. Em ambos os materiais, a variação da temperatura da água não é significativa para as condições de resfriamento empregadas.

ABSTRACT

High strength low alloy steel (HSLA) designed to be applied for oil and gas pipeline must offer excellent combination of mechanical strength, tenacity, ductility and weldability. The American Petroleum Institute which regulates the HSLA steels used for oil applications, determines the mechanical requirements for certification these materials class. In this sense, in this dissertation was analyzed the influence of the parameters of quenching and tempering in yield strength, tensile strength, elongation and hardness of two HSLA steels taken from two API 5L tubes, from manufacturers A and B. The thermal cycles analyzed were: for the quenching soaking temperatures of 880, 920 e 960°C, cooling water at 15, 23 and 31°C and tempering temperatures of 530, 600 e 670°C. Therefore, an experimental technique design was used in order to reduce the number of experiments and the number of parameter optimizations evaluated. After heat treatments, the specimens were evaluated by the tensile tests, hardness and metallographic analysis. Moreover, the regression model proposed meets satisfactorily the prediction of the mechanical properties for the heat treatment parameter range used. The results indicate that quenching at 880°C and the tempering at 530 and 600°C were the most suitable for heat treatment parameters for steel A. The best results for steel B were obtained for quenching at 960°C since, in this case, the tempering temperature range used in this work was not relevant for its mechanical properties. In both materials, the variation of quenching water temperature is not significant for the cooling conditions employed.

1 INTRODUÇÃO

1.1 POSICIONAMENTO DO ESTUDO

No Brasil, a exploração no mar correspondeu a 90,3% da produção de óleo e gás natural liquefeito e a 75,2% da oferta de gás natural não liquefeito em 2014 (ANP, 2015), em concordância com o grande volume de descobertas desses recursos em águas marinhas. Significativamente, o progresso da exploração em águas profundas, devido ao seu posicionamento estratégico no mercado energético global, representa um cenário de desafios tecnológicos e, conseqüentemente, constantes investimentos em pesquisa.

Os aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL), normatizados pelo *American Petroleum Institute* (API), são destinados para aplicações em bacias petrolíferas e necessitam apresentar níveis relativamente altos de resistência mecânica e tenacidade, associadas a boa ductilidade e soldabilidade. Essa linha de aços permite a confecção de tubos menos espessos mantendo as propriedades estipuladas para a devida aplicação, resultando em redução dos custos de confecção e montagem de linhas de oleodutos e gasodutos.

Os tubos utilizados para exploração de óleo e gás podem ser classificados em duas classes: tubos com costura e tubos sem costura. Os tubos utilizados neste trabalho são tubos sem costura, ou seja, não apresentam cordão de solda na direção longitudinal ou helicoidal. O emprego deste tipo de tubo evita a redução da capacidade de deformação do material antes da fratura que ocorre devido à fragilização por hidrogênio, uma vez que a concentração deste elemento químico em combustíveis fosseis é elevada e a interação entre seus átomos e o cordão de solda induzem a formação de corrosão, propagação de trincas e, portanto, incidência de fratura. Mohtadi-Bonab *et al.* (2014) apontam a fragilização por hidrogênio como sendo a maior causa de danos nos aços para dutos e motivação de várias pesquisas no intuito de melhor compreensão de suas causas e efeitos. Dessa forma, a utilização de tubos sem costura aumenta a confiabilidade do projeto no qual estes tubos são utilizados.

As propriedades metalúrgicas de aços e ligas metálicas, oriundas das mais diversas composições e rotas de processamento termomecânico, são amplamente estudadas como forma de garantir o melhor desempenho nas diversas condições de serviço pelas quais esses materiais

são submetidos. No caso dos aços API, torna-se necessário um adequado controle microestrutural, principalmente a partir da adição balanceada de elementos de liga. Os tratamentos termomecânicos atuais utilizam a laminação controlada com resfriamento acelerado para obter as melhores condições entre resistência e tenacidade.

A construção de dutos requer adequação ao perfil do terreno ou do local de instalação e, dependendo desta condição, pode ser necessário realizar o curvamento dos tubos. Os aços API 5L tratados neste trabalho são conformados através do processo de curvamento por indução de alta frequência, resultado do aquecimento de uma bobina de cobre através da passagem de uma corrente elétrica alternada por indução eletromagnética. Este procedimento pode provocar alterações nas propriedades mecânicas requeridas pela norma API 5L (2012) e, sendo assim, é imprescindível ajustar os parâmetros de tratamentos térmicos após curvamento para atender os valores preconizados pela norma.

A análise da influência de tratamentos térmicos nas propriedades mecânicas de amostras de aço demanda uma extensa quantidade de análises, o que pode tornar indesejavelmente oneroso o procedimento. O advento do planejamento experimental permitiu melhorar o rendimento de processos e produtos com redução do tempo e dos custos decorrentes de ensaios.

O estudo aqui proposto tem por finalidade avaliar os efeitos dos tratamentos térmicos de têmpera e revenido, em conformidade com as possibilidades em escala industrial, nas características microestruturais e nas propriedades mecânicas de tubos de aços API 5L de dois fabricantes, a partir da norma API 5L (2012) e utilização da metodologia de planejamento experimental.

O presente trabalho se apresenta como uma contribuição ao estudo dos tratamentos térmicos de têmpera e revenido em aços API 5L X65 curvados por indução utilizando planejamento experimental como forma de otimizar os experimentos da dissertação. O processo de curvamento por indução altera a microestrutura do aço e, portanto, de suas propriedades mecânicas. Em muitos casos, as partes curvadas por indução passam a não atender as especificações das normas técnicas, sendo necessária a realização de tratamento térmico posterior. Por conta disso, deseja-se avaliar o efeito da têmpera e do revenido como forma de estabelecer condições adequadas de tratamento térmico que garanta que as propriedades do aço após curvamento a quente atenda a norma API 5L (2012). Os ciclos térmicos a serem utilizados neste estudo são especificados para adequar o limite de resistência à tração, limite de escoamento e dureza dos tubos API 5L X65 de dois fornecedores dentro das condições técnicas utilizadas pela empresa Protubo.

Existe uma quantidade considerável de publicações acerca dos aços API 5L X65, mas os parâmetros específicos usados nos tratamentos térmicos dessa dissertação, assim como a aplicação de metodologias de inferência estatística no planejamento e análise dos experimentos, que é pouco explorada para otimização dos processos em escala industrial, são novas contribuições.

1.2 OBJETIVOS

- Determinar as condições de tratamentos térmicos para que os aços de cada fabricante atendam a norma API 5L X65 (2012)
- Correlacionar o desempenho mecânico com os tratamentos térmicos de têmpera e revenido em dois tubos distintos de aço API 5L X65, atendendo a norma API 5L (2012);
- Determinar modelos de regressão capazes de prever os valores das propriedades mecânicas a partir das variáveis envolvidas nos tratamentos térmicos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA

O setor de Petróleo e Gás é responsável pela maior parte da demanda energética mundial e as projeções para as próximas décadas indicam o quão é relevante o avanço tecnológico para atender as indústrias de extração, transporte e processamento. Portanto, o desenvolvimento de aços com propriedades mecânicas destinadas para o uso sob ampla pressão é indispensável.

Os aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) são característicos pela alta resistência mecânica, elevada tenacidade à fratura em baixas temperaturas, boa ductilidade e boa soldabilidade em função do baixo carbono equivalente. Sant'Anna (2006) aponta a utilização de aços ARBL para confecção de tubos como sendo de grande relevância pela significativa capacidade de trabalho com altas cargas mesmo utilizando pequenas espessuras, permitindo redução de custo na produção de malhas de dutos.

Torrico (2006) destaca que a composição química dos ARBL deve apresentar microadições de elementos de liga em várias combinações e sem ultrapassar 8% do peso total, enquanto os teores de carbono e manganês devem ser, respectivamente, de 0,05 a 0,25% e até 2%.

De acordo com El-Danaf *et al.* (2013), os aços ARBL normatizados pela API são endurecíveis pelos seguintes mecanismos: refino de grão, por precipitação ou por solução sólida. Segundo Guimarães (1997) o refino de grão é o mecanismo mais desejável por promover aumento simultâneo da resistência mecânica e da tenacidade. Ogata (2009) afirma que o endurecimento por precipitação e refino de grão responde por cerca de 60% do aumento do limite de resistência do material.

Caldeira (2006) afirma que o uso da laminação controlada maximiza o efeito dos microligantes de Nb, V e Ti no controle do tamanho de grão e endurecimento por precipitação. Enquanto Ogata (2009) indica que a composição química, em conjunto com o processo de laminação das chapas e as etapas de conformação do tubo, responde pelo aumento de resistência e de soldabilidade do material.

Os aços destinados para fabricação de gasodutos e oleodutos são padronizados por um comitê especial denominado *American Petroleum Institute* (API), através do documento API

5L – *Specification for Line Pipe*. A norma especifica propriedades mecânicas, composição química, processo de fabricação, controle dimensional e aspectos de soldagem vitais à segurança nas aplicações desses produtos.

Os processos termomecânicos alteram a microestrutura dos metais com o objetivo de otimizar suas propriedades mecânicas. Segundo Ogata *et al.* (2008), os aços ARBL possuem microestrutura constituídas de matriz ferrítica, perlita, bainita, agregados eutetóides e martensita. A evolução dos métodos de fabricação de dutos de aços ARBL permite estabelecer relações entre processamento, composição química, microestrutura e, conseqüentemente, propriedades mecânicas.

2.2 AÇOS API

A evolução dos aços API passou por mudanças significativas para atender as indústrias do segmento de óleo e gás: tubulações de diâmetro maior, operação sob alta pressão, resistência a corrosão, menor espessura da parede associado às reduções dos custos de material, fabricação e montagem.

A norma API 5L é o principal documento para especificação técnica dos dutos de petróleo e gás, categorizando os produtos em dois níveis de classificação, identificados como PSL1 e PSL2, em função do rigor técnico desejado. Enquanto o PSL1 determina padrões de qualidade gerais, o PSL2 apresentam critérios restritivos como maior controle de composição química e de propriedades mecânicas – neste âmbito, prevendo condições para o teste de impacto Charpy e para ensaios não-destrutivos. Em termos de aplicações, os níveis diferem-se pelas condições de serviços nas quais os tubos são submetidos, aplicações mais críticas e severas requerem inspeções complementares aos tubos. Além disso, os aços API são especificados por seu limite de escoamento mínimo, em unidades inglesas (ksi), por exemplo, X60 (60.200 ksi), X70 (70.300 ksi) e X80 (80.500 ksi).

Hillenbrand *et al.* (2001) salientam que até meados da década de 60 para início dos anos 70, a composição química dos API sofreu redução no teor de carbono e ganhou adições de microligantes como vanádio e nióbio, e passou a ser processado por laminação controlada, resultando nos aços grau X70. Segundo Hippert Júnior (2004), os níveis de resistência mecânica e tenacidade dos aços API até grau X70 são obtidos pela associação de microestrutura refinada

e endurecimento por precipitação, em virtude da presença de carbonetos de Ti, V ou Nb dispersos na matriz ferrítica.

Dentro de uma visão de evolução do processo, o uso de resfriamento acelerado em conjunto com a laminação controlada gerou os aços grau X80 (HILLENBRAND *et al.*, 2004). Incluso nesses avanços, melhorias no resfriamento acelerado mediante inserção de elementos como cobre, molibdênio e níquel possibilitaram o desenvolvimento dos aços grau X100 e X120 nos últimos anos. Desse modo, o avanço tecnológico dos aços API, além de melhorar as propriedades mecânicas e atender diversas condições de serviço, permitiu redução dos custos de projetos em decorrência de um menor consumo de material, conforme pode ser visualizado na FIG. 2.1.

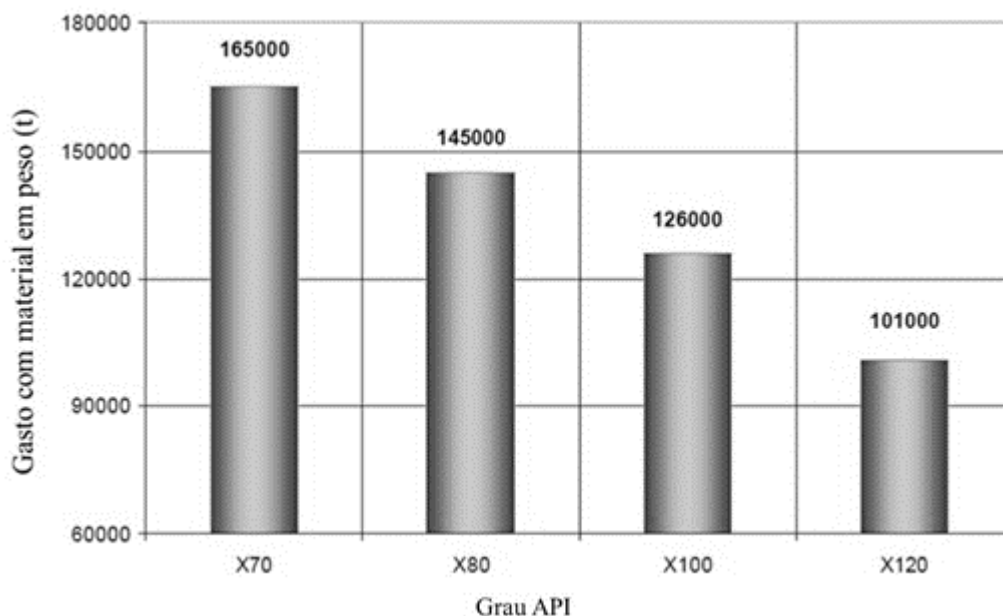


FIG. 2.1 Economia de material devido ao uso do aço API para um determinado diâmetro do tubo (HILLENBRAND *et al.*, 2004). Adaptada

A composição química possui um papel relevante na temperabilidade dos aços ARBL, isto é, na maior ou menor facilidade de formar martensita. Além disso, a presença de carbono pode propiciar a fragilização dos aços através do surgimento de trincas induzidas por hidrogênio.

A medida de carbono equivalente é prevista pela norma API 5L, sendo que para o aço utilizado neste trabalho, API 5L X65, classificado como nível de qualidade PSL 2, apresenta duas equações em função do percentual em peso de outros elementos de liga. A EQ. 2.1, elaborada por Ito e Bessyo (1968), deve ser utilizada para teores de carbono igual ou inferior a 0,12%, enquanto a EQ. 2.2, em acordo com o *International Institute of Welding* (IIW), é referente a teores de carbono acima de 0,12%.

$$CE_{Pcm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad \text{EQ. 2.1}$$

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} \quad \text{EQ. 2.2}$$

O estudo do desenvolvimento de microestruturas para alcance de propriedades mecânicas adequadas deve associar alta resistência mecânica com níveis apropriados de tenacidade. Porém, com a FIG. 2.2 é possível constatar, a relação entre resistência e tenacidade é inversamente proporcional. Portanto, para atingir aumento simultâneo destas duas propriedades é necessário deslocar a curva esquematizada na direção destacada (GUIMARÃES, 1997).

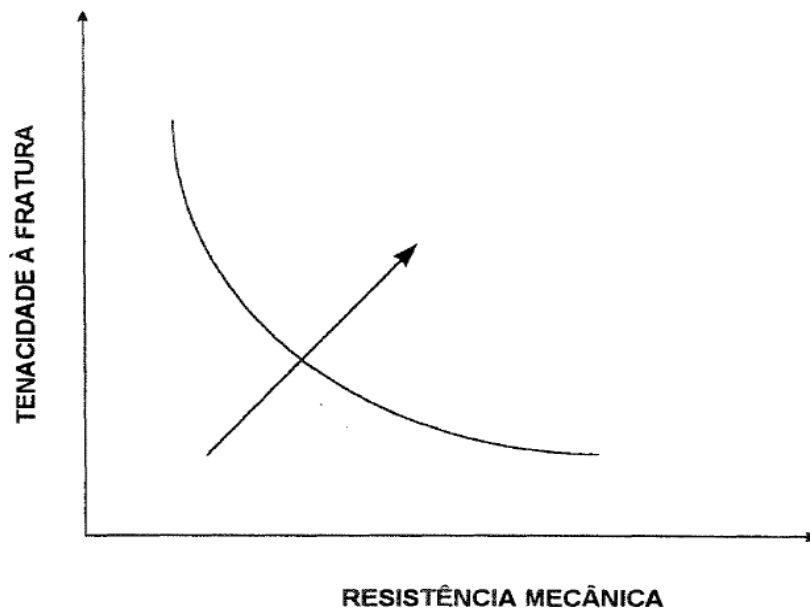


FIG. 2.2 Relação inversa entre resistência mecânica e tenacidade à fratura (GUIMARÃES, 1997).

2.3 PROCESSO DE CURVAMENTO POR INDUÇÃO

O processo de curvamento por indução de alta frequência é um processo de conformação resultado do aquecimento de uma bobina de cobre através da passagem de uma corrente elétrica alternada (i_b) por indução eletromagnética. A bobina envolve o tubo metálico sem haver contato. A passagem de corrente alternada gera um campo magnético e por indução eletromagnética aplicada ao tubo, uma corrente de Foucault (i_t) é produzida e promove aquecimento do tubo por efeito Joule.

A conformação do tubo é realizada pela colocação da extremidade a ser curvada num grampo ligado ao braço giratório, previamente programado com o raio de curvamento desejado, produzindo um momento fletor necessário para deformação contínua. A outra extremidade é acoplada em um carro impulsor e deslocada em velocidade constante com aplicação de força adequada para efetuar o curvamento (FIG. 2.3).

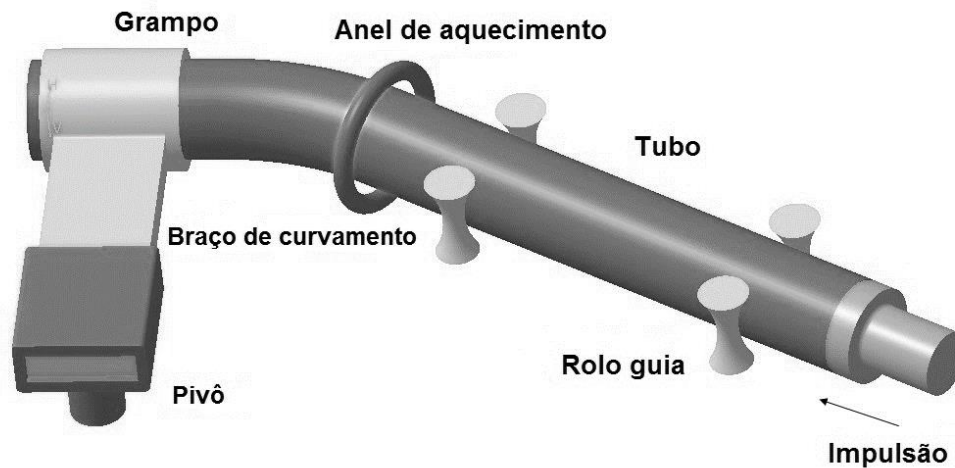


FIG. 2.3 Modelo do processo de curvamento por indução (XUN *et al.*, 2014). Adaptada

O curvamento ocorre na região onde se localiza a bobina, devido ao aquecimento quase instantâneo deste trecho do tubo. A seção aquecida, ao sair da bobina, passa por resfriamento rápido. O aquecimento indutivo em toda espessura do tubo não é homogêneo, mas concentra-se na superfície externa. Logo, a temperatura da superfície externa do tubo é maior em relação à interna. A condução de calor na superfície externa aquecida promove transferência de calor para a superfície interna. Segundo Meireles (2009), duas variáveis ocasionam este gradiente de temperatura: profundidade atingida pela corrente de Foucault e velocidade de deslocamento do tubo na bobina de indução.

2.4 CARACTERÍSTICAS MICROESTRUTURAIS DO AÇO API 5L X65

Krauss e Thompson (1995) revisaram as microestruturas ferríticas produzidas pela decomposição da austenita em resfriamento contínuo para aços baixo carbono e ultrabaixo carbono e propuseram uma nomenclatura em acordo com *Iron and Steel Institute of Japan* (ISIJ), conforme apresentado na FIG. 2.4.

SÍMBOLO	NOMENCLATURA
α_p	Ferrita poligonal
α_q	Ferrita quase-poligonal
α_w	Ferrita de Widmanstätten
$\alpha^\circ B$	Ferrita Bainítica ou acicular
αB	Ferrita Bainítica granular
γ_r	Austenita retida
MA	Constituinte Martensita/Austenita
αM	Martensita
B	Bainita
Bu	Bainita Superior
B _L	Bainita Inferior
P	Perlita
P'	Perlita degenerada
Θ	Cementita

FIG. 2.4 Simbologia e nomenclatura sugerida para aços ARBL (KRAUSS; THOMPSON, 1995). Adaptada.

Em um estudo de investigação da evolução microestrutural, Ogata *et al.* (2008) austenitizaram e resfriaram sob diferentes taxas amostras de aço API 5L X65 para caracterização microestrutural, medição do tamanho de grão médio (TG) de ferrita e realização de ensaios de microdureza, sendo que tais resultados podem ser visualizados na TAB. 2.1.

TAB. 2.1 Microestrutura, tamanho médio de grão e dureza avaliadas em aço API 5L X65 em diferentes taxas de resfriamento.

TAXA DE RESFRIAMENTO (°C/s)	MICROESTRUTURA	TG DE FERRITA (μm)	DUREZA (HV)
0,5	Ferrita poligonal e perlita	14 μm	156
1	Ferrita poligonal e lamelas finas de perlita	14 μm	167
5	Ferrita poligonal, ferrita quase poligonal, perlita degenerada, bainita e microconstituente MA	13 μm	194
10	Ferrita poligonal, ferrita quase poligonal, perlita degenerada, bainita e microconstituente MA	10 μm	214
20	Ferrita quase poligonal, bainita e microconstituente MA refinado	7 μm	216
30	Ferrita, bainita e microconstituente MA	6 μm	219

TG: Tamanho de grão. MA: martensita/austenita. Fonte: Ogata *et al.*, 2008. Adaptada

Seguindo a nomenclatura de Krauss e Thompson (1995), micrografias foram geradas por Ogata *et al.* (2008) através do uso de microscópio eletrônico de varredura (MEV) para cada uma das taxas de resfriamentos, conforme podem ser visualizadas nas FIG. 2.5 a FIG. 2.10.

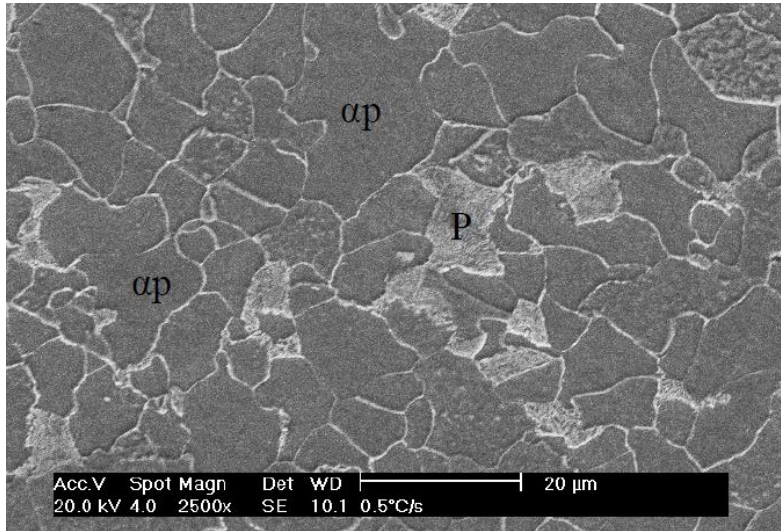


FIG. 2.5 Taxa de resfriamento de 0,5°C/s. Matriz de ferrita poligonal e perlita. Aumento de 2500X (OGATA *et al.*, 2008).

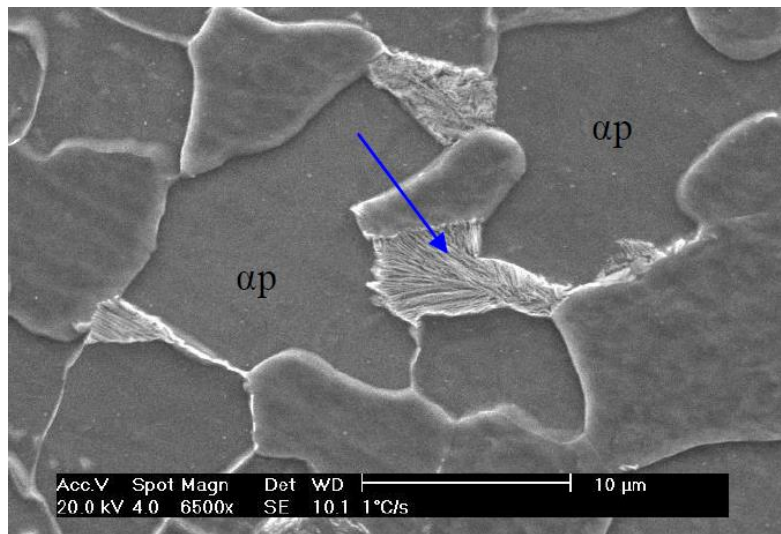


FIG. 2.6 Taxa de resfriamento de 1°C/s. Ferrita poligonal e lamelas finas de perlita indicada pela seta de cor azul. Aumento de 6500X (OGATA *et al.*, 2008).

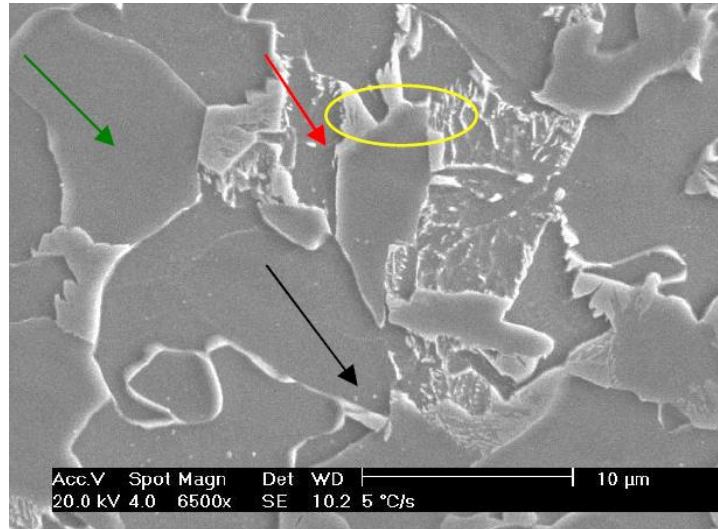


FIG. 2.7 Taxa de resfriamento de 5°C/s. Possível perlita indicada pela elipse. Perlita degenerada, martensita/austenita (MA), bainita indicadas, respectivamente, pelas setas de cor preta, vermelha e verde. Aumento de 6500X (OGATA *et al.*, 2008).

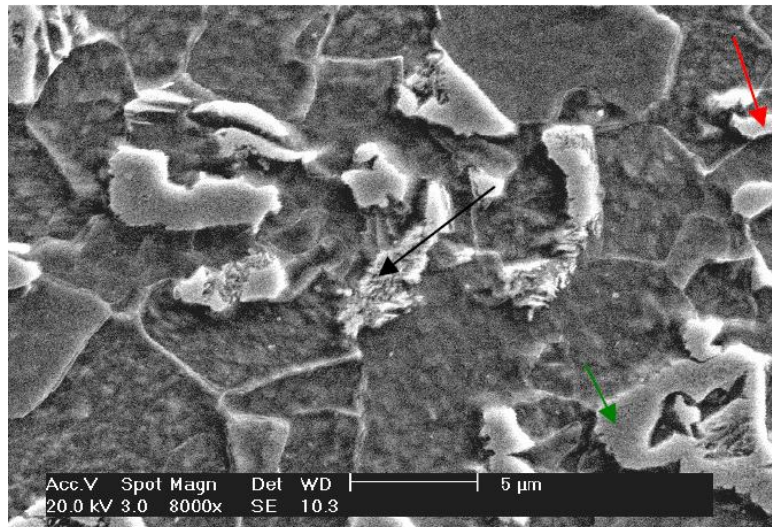


FIG. 2.8 Taxa de resfriamento de 10°C/s. Perlita degenerada, martensita/austenita (MA), bainita indicadas, respectivamente, pelas setas de cor preta, vermelha e verde. Aumento de 8000X (OGATA *et al.*, 2008).

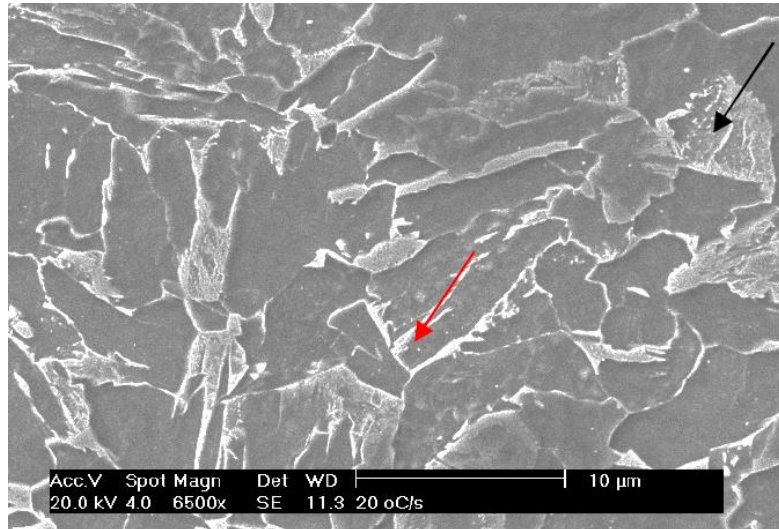


FIG. 2.9 Taxa de resfriamento de 20°C/s. Bainita e martensita/austenita (MA) indicadas, respectivamente, pelas setas de cor preta e vermelha. Aumento de 6500X (OGATA *et al.*, 2008).

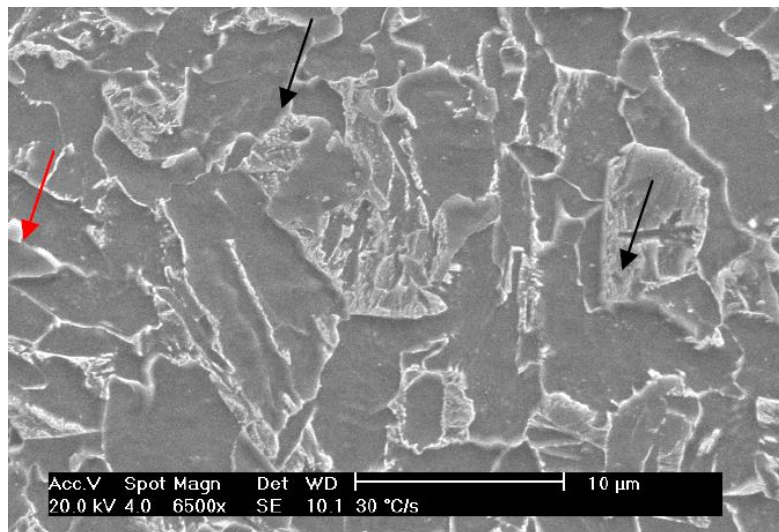


FIG. 2.10 Taxa de resfriamento de 30°C/s. Bainita e martensita/austenita (MA) indicadas, respectivamente, pelas setas de cor preta e vermelha. Aumento de 6500X (OGATA *et al.*, 2008).

Segundo Ogata *et al.* (2008), o aumento da taxa de resfriamento em aços API 5L X65 causa refino da microestrutura, acréscimo de dureza, aumento da fração volumétrica de agregados eutetóides e diminuição da fração volumétrica de ferrita.

A adição de microligantes e variações nos tratamentos térmicos alteram a microestrutura dos aços. A extensão dessas mudanças foi demonstrada por Oliveira (2014) em um estudo para analisar a microestrutura e os valores de resistência mecânica e dureza após ciclos térmicos de têmpera e revenido.

2.5 TRANSFORMAÇÃO POR RESFRIAMENTO CONTÍNUO

O estudo dos tratamentos térmicos de têmpera e revenido em aços API 5L X65 curvados por indução deste trabalho foram realizados atendendo as possibilidades da empresa Protubo para, posteriormente, poderem ser replicados em escala industrial. O conhecimento de formação de microconstituintes durante os tratamentos térmicos permite a obtenção de propriedades mecânicas adequadas para diversas aplicações. Os tratamentos térmicos por resfriamento contínuo são os mais práticos para aplicações industriais e utilizam-se diagramas de transformação por resfriamento contínuo (diagramas TRC) para indicar transformações do material austenitizado e resfriados continuamente em uma taxa definida.

Zhao *et al.* (2003) avaliaram o comportamento em resfriamento contínuo de aços para dutos com diferentes adições de carbono e elementos de liga, e descreveram uma série de microestruturas possíveis de se formar nos aços microligados, através da aplicação do resfriamento contínuo. Aços em diferentes composições (TAB. 2.2) foram austenitizados em 1100°C durante 10 minutos e, em seguida, mantidos por 3 minutos em 950°C para, posteriormente, serem resfriados em diferentes taxas: 0,1°C/s, 1°C/s, 10°C/s e 50°C/s.

TAB. 2.2 Composição química dos aços analisados (em peso percentual).

Aço	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ti	Mo	O	N
A#	0,045	0,3	1,94	0,0009	0,0008	-	-	-	-	0,0011	0,003
B#	0,077	0,25	1,28	0,001	0,0006	-	0,053	0,027	-	0,0011	0,0018
C#	0,025	0,24	1,56	0,002	0,0006	-	0,02	-	0,32	0,0043	0,0062

Fonte: Zhao *et al.*, 2003.

Os diagramas de transformação por resfriamento contínuo (FIG. 2.11) apresentam as variações microestruturais geradas pela influência da composição química e das taxas de resfriamento para cada aço tratado. O aço A# apresentou transformações de ferrita acicular, ferrita poligonal e ferrita. No aço B#, foram produzidas todas as transformações presentes no aço A# e, adicionalmente, ferrita bainítica. Em contraste, para o aço C#, a formação do diagrama TRC diferencia-se moderadamente em relação aos aços A# e B#; fornecendo ferrita bainítica e ferrita poligonal.

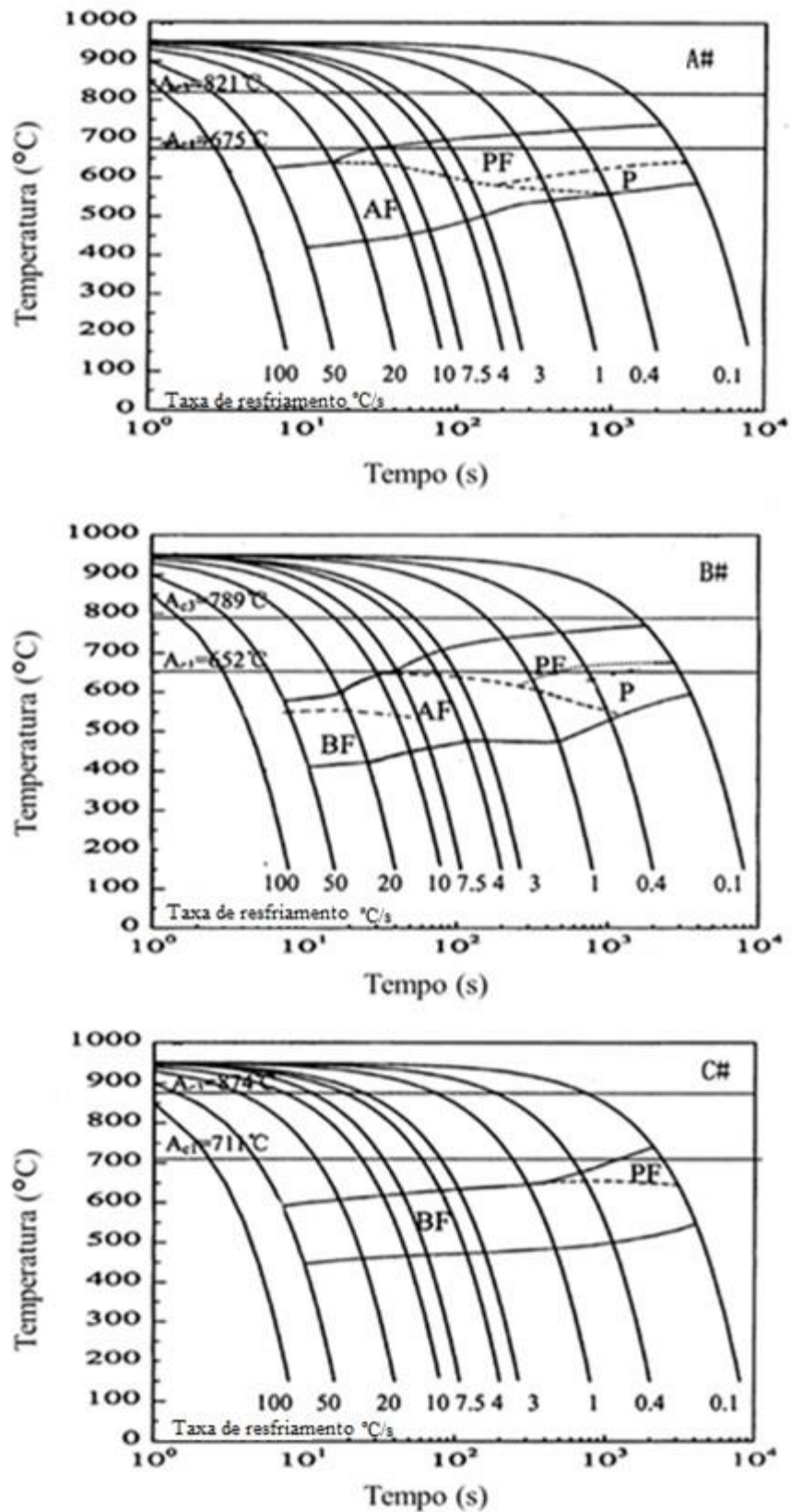


FIG. 2.11 Diagramas TRC de aços para dutos em diferentes composições (BF, ferrita bainítica; AF, ferrita acicular; PF, ferrita poligonal; P, perlita) (ZHAO *et al.*, 2003).

Monte (2013) publicou um estudo de caracterização microestrutural do aço API 5L X65 soldado por feixe de elétrons com diferentes aportes térmicos. Para estimar a microestrutura resultante em certas condições, foram levantadas curvas do diagrama TRC nas quais seriam equivalentes com as taxas de resfriamentos encontradas no processo de soldagem por feixe de elétrons. Na FIG. 2.12 é apresentado o diagrama de transformação por resfriamento contínuo citado com a indicação de frações volumétricas de cada constituinte.

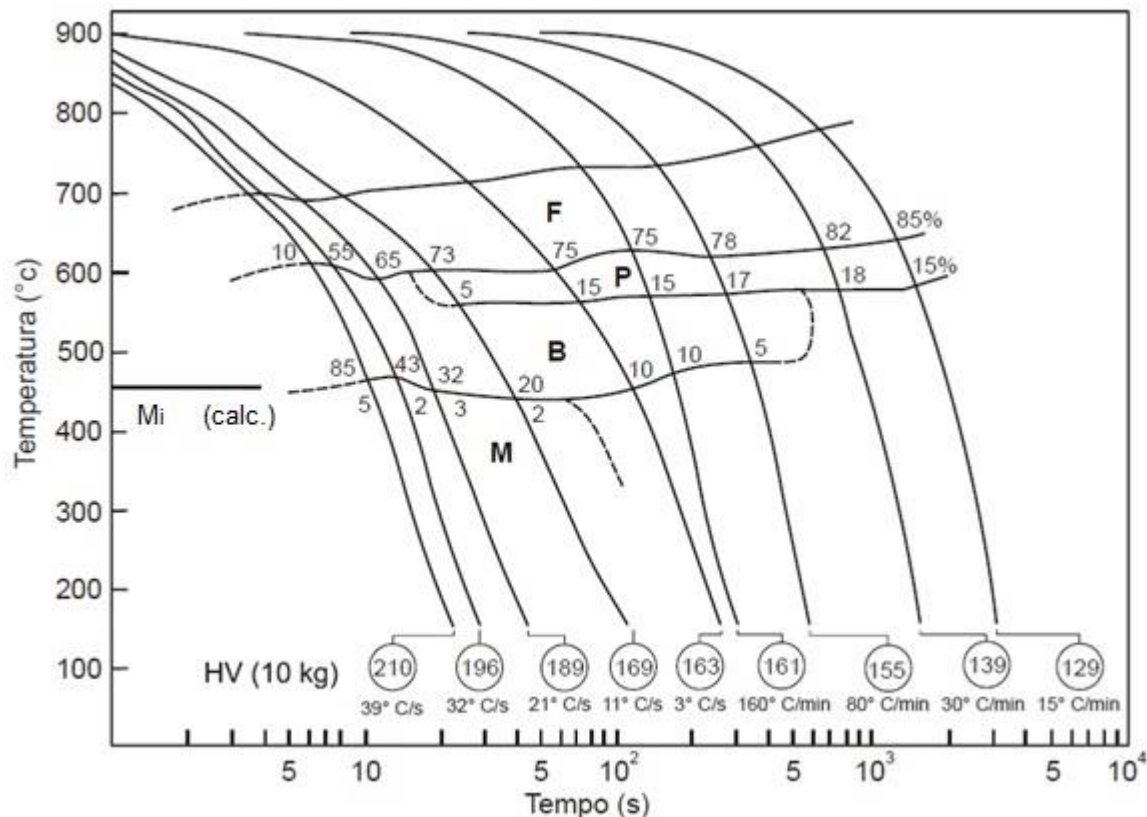


FIG. 2.12 Diagrama TRC de um aço API 5L X65 (F: ferrita, P: perlita, B: bainita e M: martensita). Os números indicam as frações volumétricas de cada constituinte (MONTE, 2013). Adaptada

2.6 TRATAMENTOS TÉRMICOS EM AÇOS API 5L X65

Sant'Anna (2006) avaliou as propriedades mecânicas e a microestrutura do aço API 5L X65 após tratamentos térmicos distintos. Amostras foram preparadas para realização do tratamento térmico de normalização (940°C por 30, 40 e 50 minutos) e homogeneização (990°C por 162 minutos), ambos com encharque de 15 minutos, seguido de tratamento térmico intercrítico (780°C por 20 minutos com diferentes taxas de resfriamento). Ensaio de dureza Vickers utilizando 20 kgf foram realizados nas amostras na condição de recebimento e nas

tratadas termicamente: amostras homogêneas e normalizadas, em comparação com as amostras recebidas, apresentaram menores valores de dureza por resultarem em grãos maiores, como demonstrado por Ogata *et al.* (2009), enquanto nas amostras dos tratamentos térmicos intercríticos ocorreu redução nos valores de dureza em virtude da formação de microestruturas menos duras como bainita e perlita em menores taxas de resfriamento. Nos ensaios de tração, o limite de escoamento e a resistência à tração das amostras homogêneas e normalizadas foram menores do que das amostras recebidas, enquanto a maior taxa de resfriamento resultou nos melhores desempenhos mecânicos (limite de escoamento e de resistência à tração) nas amostras submetidas ao tratamento intercrítico.

A determinação precisa do desempenho mecânico de dutos é de grande importância para os engenheiros de dutos. Hashemi (2011) usou dados de dureza Vickers de tubos de aço API 5L X65 para gerar correlação estatística entre dureza e limite de escoamento. Segundo Hashemi (2011), a variação nas propriedades mecânicas é uma consequência de um número de fatores, incluindo recristalização, crescimento e refino de grão, fase e precipitados. A variação dos dados de resistência e dureza nesta pesquisa pôde ser descrita por observações em MEV e são oriundas da formação de diferentes microconstituintes. Finalmente, um modelo matemático foi proposto para prever a dureza do material. A equação obtida previu resultados e confirmaram que os requisitos da norma API 5L (2012) foram cumpridos para o aço testado.

Um estudo publicado por Zhang *et al.* (2012) consistiu em realizar tratamentos térmicos de têmpera para avaliar o efeito da fração volumétrica de bainita nas propriedades mecânicas e microestruturais de aço API 5L X80. Amostras foram aquecidas em quatro diferentes temperaturas: 870°C, 840°C, 810°C e 780°C, submetidas a 7 minutos de encharque e resfriadas em água. Através de microscopia eletrônica de varredura foram encontradas maiores frações volumétricas de bainita para menores temperaturas de encharque (TAB. 2.3).

TAB. 2.3 Frações volumétricas de bainita para diferentes temperaturas de encharque.

TEMPERATURA DE ENCHARQUE (°C)	FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE BAINITA (%)
870	31
840	42
810	53
780	70

Fonte: Zhang *et al.*, 2012.

O acréscimo da fração volumétrica de bainita permite estipular um aumento nos valores de limite de escoamento, limite de resistência de tração e de dureza, enquanto a ductilidade e a resistência ao impacto devem reduzir.

A FIG. 2.13 indica aumento tanto do limite de resistência à tração como do limite de escoamento do aço API X80 com o acréscimo da fração volumétrica de bainita.

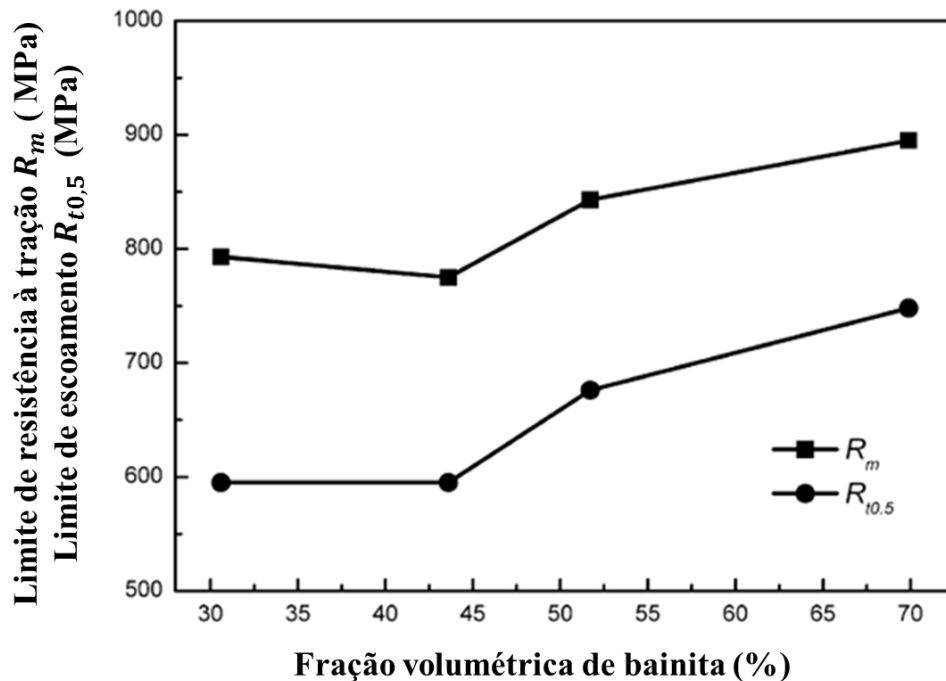


FIG. 2.13 Efeito da fração volumétrica de bainita na resistência mecânica de aço API 5L X80 (ZHANG *et al.*, 2012).

Em contrapartida, os resultados de ductilidade apontam o caminho inverso uma vez que uma maior formação de bainita causa redução dos valores de alongamento, como pode ser visualizado na FIG. 2.14. A melhor correspondência entre resistência mecânica e ductilidade foi observada nas amostras com aproximadamente 50% de fração volumétrica de bainita.

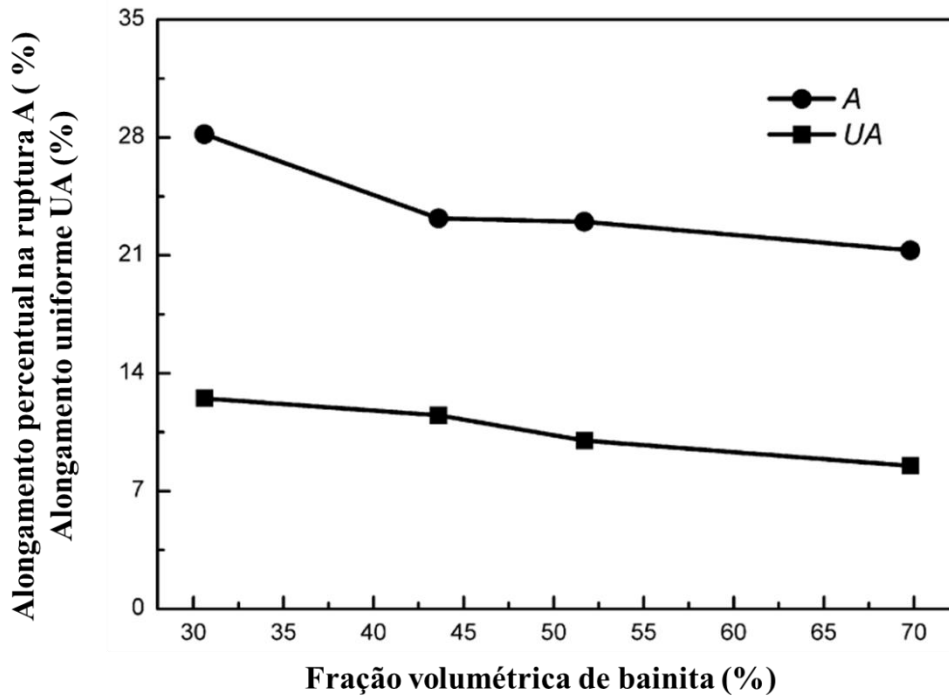


FIG. 2.14 Efeito da fração volumétrica de bainita na ductilidade de aço API 5L X80 (ZHANG *et al.*, 2012).

Oliveira (2014) realizou têmpera (com resfriamento em água) e revenido em tubos de aço API 5L X65 com composições semelhantes de dois fabricantes diferentes (Fabricante 1 e 2) para analisar o efeito dos tratamentos térmicos nos ensaios de tração e dureza. Inicialmente, algumas amostras foram temperadas em 920°C e outras em 960°C, com diferentes taxas de aquecimento para completa homogeneização das amostras. Em seguida, as amostras foram resfriadas em água e revenidas em três temperaturas diferentes: 550°C, 600°C e 650°C. Ensaios de tração foram realizados para conferir a influência dos tratamentos térmicos. As amostras recebidas e tratadas por têmpera e revenido dos dois fabricantes possuíam os limites de escoamento e resistência à tração conforme determinado pela norma API 5L (2012).

A temperatura de encharque em 920°C para o Fabricante 1 e de 960°C para o Fabricante 2, ambas associadas ao revenido em 600°C, propiciaram os maiores limites de resistência à tração e de escoamento nos tubos avaliados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

São descritos neste capítulo a composição química dos tubos, os parâmetros de tratamento térmico usados no desenvolvimento deste trabalho, o modelo de planejamento experimental proposto para redução do número de ensaios e otimização dos parâmetros, a nomenclatura empregada para distinguir as amostras de cada um dos fabricantes em suas respectivas condições de tratamento térmico e os equipamentos utilizados para levantamento dos resultados.

Tendo em vista que o objetivo deste trabalho é estabelecer os efeitos das variáveis de têmpera e revenido no desempenho mecânico dos tubos de aço API 5L tratados em condição fabril, os procedimentos experimentais deste trabalho foram realizados em escala laboratorial considerando a reprodutibilidade em linha industrial.

3.1 MATERIAIS

Tubos de aço API 5L de dois fabricantes distintos, em nível de qualidade PSL 2, laminados pelo processo Mannesmann foram utilizados para o desenvolvimento deste trabalho, sendo esses materiais fornecidos pela empresa Protubo. O tubo do Fabricante A possuía certificação API 5L X65, enquanto o tubo do Fabricante B era documentado como API 5L X60/65, ou seja, possui requisitos compreendendo duas faixas contínuas da norma API 5L (2012). As composições químicas dos tubos de cada um dos fabricantes podem ser visualizadas na TAB. 3.1.

TAB. 3.1 Composição química dos aços API 5L em estudo.

		COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)							
	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	P	S
Fabricante A	0,1	1,1	0,27	0,09	0,13	0,1	0,11	0,017	0,005
	Al	Ti	Nb	V	N	B	Ca	Fe	
	0,027	0,002	0,02	0,06	0,008	0,0002	0,0014	Restante	
Fabricante B	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	P	S
	0,09	1,36	0,29	0,01	0,09	0,01	0,013	0,011	-
	Al	Ti	Nb	V	N	B	Ca	Fe	
	0,014	0,001	0,03	0,038	-	0,0002	-	Restante	

Fonte: Certificado de Inspeção dos Fabricantes A e B, 2016. Adaptada.

O tudo do Fabricante A apresentava diâmetro externo de 219,1 mm e espessura da parede de 22,2 mm enquanto o tubo proveniente do Fabricante B possuía diâmetro externo de 215,9 mm e espessura de 19,05 mm. A partir disto, foram extraídos trechos retos dos tubos ao longo da direção longitudinal, sendo tais partes denominadas de “cupons” e que serviram como matriz para os tratamentos térmicos, confecção dos corpos de provas e preparação das amostras metalográficas utilizadas neste trabalho.

As etapas de desenvolvimento da dissertação contemplam procedimentos experimentais e exercícios estatísticos, reduzindo o número de ensaios e otimizando parâmetros de processo, sem detrimento na qualidade dos resultados. O fluxograma utilizado para o desenvolvimento deste trabalho está descrito na (FIG. 3.1).

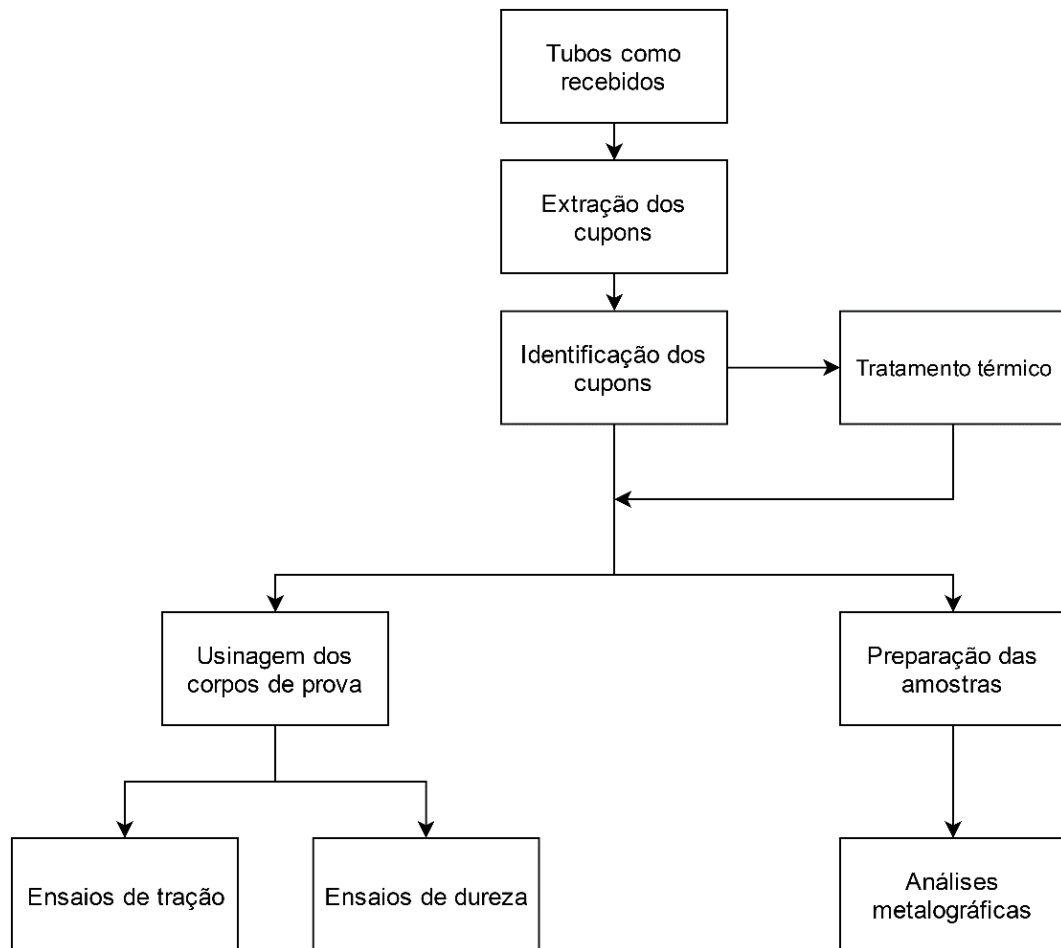


FIG. 3.1 Fluxograma de planejamento do trabalho.

3.2 MÉTODOS

Foram extraídos cupons como recebidos de cada um dos Fabricantes, sendo que os demais foram identificados e tratados termicamente com posteriores preparação para análise metalográfica e usinagem para realização de ensaios mecânicos de tração e dureza.

Em decorrência do grande número de experimentos associados à quantidade de variáveis e níveis dos tratamentos térmicos pelos quais os cupons estão sujeitos, o planejamento de *Box-Behnken* foi utilizado como ferramenta de inferência estatística.

3.2.1 TRATAMENTOS TÉRMICOS

As variáveis de têmpera e revenido, utilizadas neste trabalho, buscam avaliar as melhores condi es de ciclo térmico para melhor desempenho mecânico dos tubos dos Fabricantes A e B dentro dos requisitos previstos pela norma API 5L (2012) e levam em considera o a produ o em escala industrial. As têmperas consistiram na completa austenitiza o em três temperaturas de encharque distintas: 880, 920 e 960 C e com resfriamentos em água nas temperaturas de 15, 23 e 31 C; e os revenidos em 530, 600 e 670 C acompanhados de resfriamentos ao ar.

Antes de iniciar os tratamentos térmicos, termopares foram acoplados aos cupons e conectados a um registrador gráfico da marca Jumo, modelo Logoscreen 500 CF. Assim, as medi es de temperatura puderam ser armazenadas para avalia o posterior. Os tratamentos térmicos foram realizados nas instala es da Protubo, utilizado um forno da marca Combustol com potência de 10 kW (FIG. 3.2) com ajuste de temperatura no visor frontal.



FIG. 3.2 Forno Combustol utilizado para os tratamentos térmicos.

Os ciclos térmicos iniciaram com a inser o dos cupons no forno previamente aquecido em 30 C e, simulando o que   observado em escala industrial, foram tratados termicamente em diferentes taxas. Na FIG. 3.3, podem ser visualizados as curvas de aquecimento para cada uma das etapas de encharque.

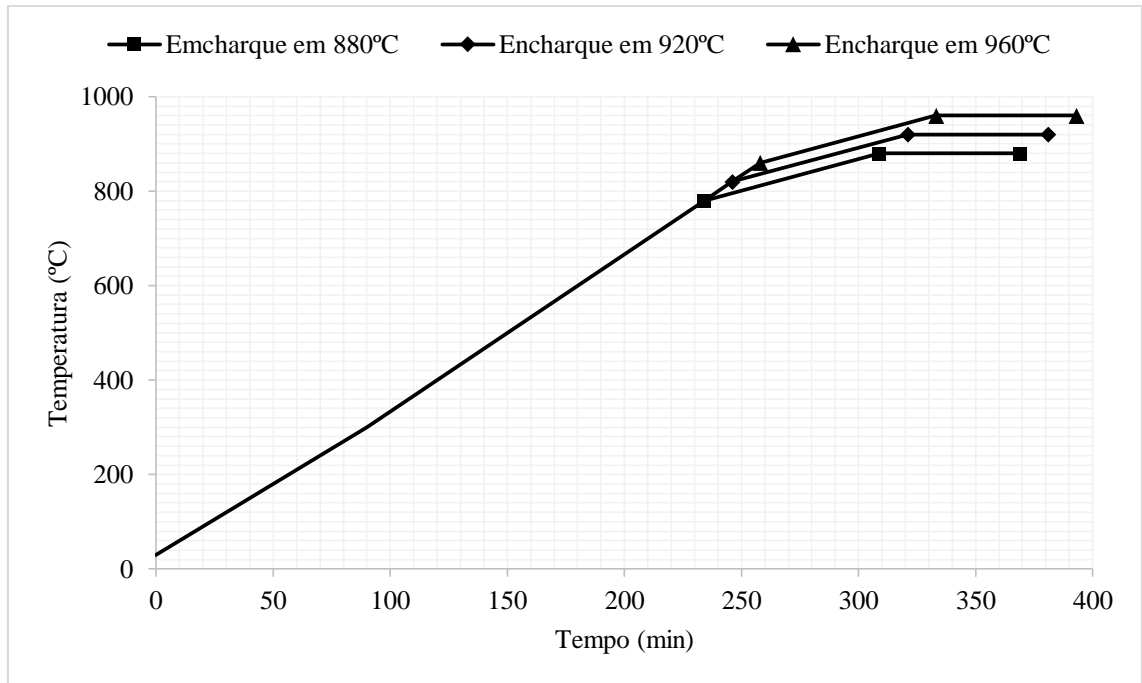


FIG. 3.3 Curvas de aquecimento para as diferentes temperaturas de encharque. As taxas de aquecimento são, respectivamente: 200, 115 e 50°C/h.

As curvas de aquecimento para as diferentes temperaturas de revenido estão ilustradas na FIG. 3.4.

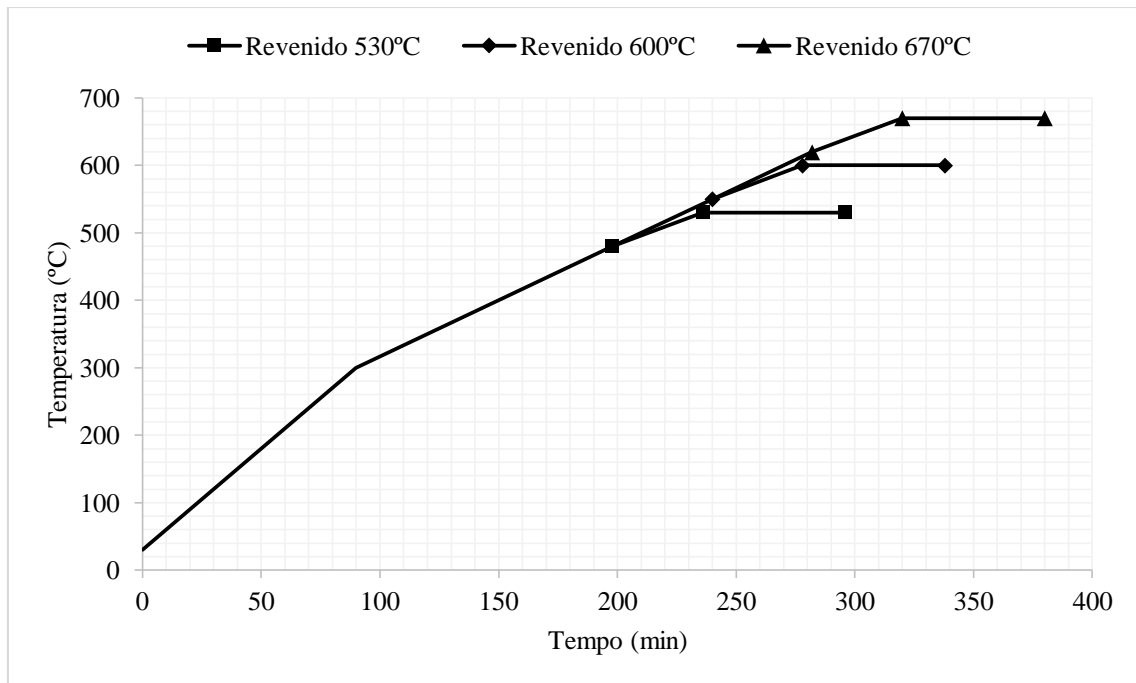


FIG. 3.4 Curvas de aquecimento para as diferentes temperaturas de revenido. As taxas de aquecimento são, respectivamente: 200, 80 e 50°C/h.

Com a finalidade de equalizar as análises durante a têmpera, os cupons foram mantidos na temperatura de encharque por 60 minutos a fim de garantir uma adequada homogeneização.

Um aspecto a ser considerado durante o processo industrial para a têmpera provém da queda de temperatura dos tubos ao final da austenitização em virtude do tempo necessário até sua imersão em água e, para simular esta perda em rota industrial, ao final da austenitização, quando verificada uma redução de 90°C no material, este foi mergulhado na água para concluir a etapa de têmpera. O roteiro supracitado está resumido na TAB. 3.2.

TAB. 3.2 Parâmetros de tratamentos térmicos de têmpera.

TÊMPERA	Temperatura de encharque (°C)	Tempo de encharque (min)	Temperatura do cupom para imersão em água (°C)
	880	60	790
	920	60	830
	960	60	870

Fonte: Autor.

Para os revenidos, o tempo de encharque de 60 minutos também se aplicou para todos os cupons (TAB. 3.3).

TAB. 3.3 Parâmetros de tratamentos térmicos de revenido.

REVENIDO	Temperatura de revenido (°C)	Tempo de encharque (min)
	530	60
	600	60
	670	60

Fonte: Autor.

Nas linhas industriais pelas quais estes tubos são tratados termicamente, é observado um aumento de até 6°C na temperatura da água após a etapa de resfriamento e, para simular as condições de resfriamento verificadas em escala fabril, foi necessário balancear a massa de água utilizada no resfriamento em relação ao tamanho dos cupons. Dessa forma, o tanque e o volume de água utilizado em escala laboratorial foram ajustados para reproduzir esta mesma variação de temperatura. Assim, os resfriamentos reproduzidos para este trabalho, apontaram para um acréscimo na temperatura da água, em função da imersão dos cupons ao final da etapa de encharque, de até 6°C.

3.2.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A estatística nas metodologias de planejamento experimental (ou DOE, de *Design of Experiments*) é, simplificadamente, um procedimento para redução de custos, tomada de decisão e otimização de processos, sem prejuízo na qualidade dos resultados. Além disso, são frequentemente usados em experimentos envolvendo a necessidade de estudar o efeito do conjunto de fatores sobre uma resposta (MONTGOMERY, 2012).

Neste trabalho, as discussões são desenvolvidas em torno das temperaturas de encharque e da água para têmpera e da temperatura de revenido. Todas estas variáveis oscilam ao redor de três níveis, ou seja, cada variável de temperatura (encharque, água e revenido) apresentam três valores: um mínimo, um médio e um máximo.

Um experimento com três níveis (mínimo, intermediário e máximo) é descrito como planejamento fatorial 3^k e, para definir as diretrizes de amostragem e modelagem do experimento, são adotadas técnicas de superfície de resposta (RSM, do inglês, *Response Surface Methodology*). Uma comparação realizada por Ferreira *et al.* (2007) entre os Métodos Superfícies de Resposta (MSR) sinalizou o planejamento modelado por Box e Behnken (1960) como mais eficiente em experimentos fatoriais 3^k . O Planejamento *Box-Behnken* (PBB) emprega arranjos de experimentos que são retratados pelos pontos médios e ponto central do espaço experimental, tais combinações refletem alterações simultâneas das variáveis de entrada e possibilitam avaliar os efeitos sinérgicos entre as variáveis associados à uma resposta (FIG. 3.5).

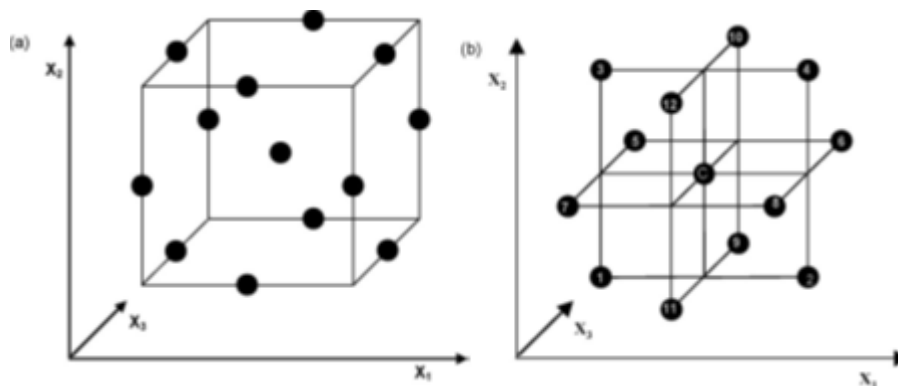


FIG. 3.5 Representação do espaço experimental no Planejamento *Box-Behnken* (FERREIRA *et al.*, 2007). Adaptada.

Segundo Bezerra *et al.* (2008), a aplicação de experimentos com três fatores não é tão frequente por conta de limitações analíticas na otimização de processos, mas as matrizes do

Planejamento *Box-Behnken* se mostram eficientes e, em virtude disso, o número de publicações com a execução desta metodologia aumentou significativamente nos últimos anos.

Seguindo a mesma direção, alguns estudos na área metalúrgica foram publicados em diversas linhas de pesquisa. Ebrahimifar *et al.* (2013) utilizaram a metodologia de superfície de resposta para melhorar as propriedades de revestimento de cobalto em aço inoxidável AISI 430, enquanto Balasubramanian (2015) realizou estudos com a liga Ti-6Al-4V e aço inoxidável AISI 304, empregando o planejamento de *Box-Behnken* para otimizar experimentos na investigação dos parâmetros de pressão, temperatura e tempo pertinentes ao processo de difusão e suas influências nas propriedades de microdureza e cisalhamento. Wiskel *et al.* (2015) adotaram o modelo de *Box-Behnken* para aprimorar o limite de resistência à tração em tubos de aço API X70.

O número mínimo de experimentos (N) para desenvolver um Planejamento *Box-Behnken* é definido através da EQ. 3.1, onde k é o número de variáveis (fatores) e C₀ é o número de pontos centrais. Na intenção de aumentar a precisão dos dados a serem gerados, é necessário realizar no mínimo 03 ensaios no ponto central (C₀).

$$N = 2k(k - 1) + C_0 \quad \text{EQ. 3.1}$$

Com o objetivo de avaliar a influência dos tratamentos térmicos de têmpera e revenido nas propriedades mecânicas dos tubos de aço API 5L dos Fabricante A e B, através dos ensaios de tração e dureza, é preciso realizar um delineamento experimental no qual as variáveis e suas interações entre os fatores são analisadas em relação ao desempenho mecânico dos aços de cada um dos fabricantes. Como mencionado anteriormente, as variáveis a serem analisadas são as temperaturas de encharque e da água na têmpera e a temperatura de revenido, cada uma dessas variáveis apresenta três níveis, ou seja, valores mínimos, médios e máximos, conforme descrito na TAB. 3.4.

TAB. 3.4 Variáveis de tratamento térmico utilizadas para o planejamento experimental.

VARIÁVEIS	VALORES FÍSICOS		
Temperatura de encharque (°C)	880	920	960
Temperatura da água (°C)	15	23	31
Temperatura de revenido (°C)	530	600	670
NÍVEIS	-	0	+

Fonte: Autor.

Dessa forma, por meio do Planejamento de *Box-Behnken* tem-se a seguinte matriz de experimentos a serem realizados (TAB. 3.5).

TAB. 3.5 Matriz de experimentos delineadas pelo método de *Box-Behnken*.

EXPERIMENTOS	Temperatura de encharque (°C)	Temperatura da água (°C)	Temperatura de revenido (°C)
1	-	-	0
2	+	-	0
3	-	+	0
4	+	+	0
5	-	0	-
6	+	0	-
7	-	0	+
8	+	0	+
9	0	-	-
10	0	+	-
11	0	-	+
12	0	+	+
C	0	0	0
C	0	0	0
C	0	0	0

Fonte: Autor.

A notação de sinais (-, 0 e +) é usada para simplificar a matriz de planejamento numa relação entre experimento, variável e nível. Substituindo os sinais pelo valores físicos, temos a seguinte matriz (TAB. 3.6).

TAB. 3.6 Matriz das rotas de tratamento térmico delineadas pelo método de *Box-Behnken*.

EXPERIMENTOS	Temperatura de encharque (°C)	Temperatura da água (°C)	Temperatura de revenido (°C)
1	880	15	600
2	960	15	600
3	880	31	600
4	960	31	600
5	880	23	530
6	960	23	530
7	880	23	670
8	960	23	670
9	920	15	530
10	920	31	530
11	920	15	670
12	920	31	670
C	920	23	600
C	920	23	600
C	920	23	600

Fonte: Autor.

Tendo por base a matriz de experimentos a partir de cada condição de rota térmica estabelecida, são geradas as respostas através dos ensaios de tração e dureza para verificação

da influência das variáveis no desempenho mecânico. As etapas de tratamento térmico a serem executadas estão descritas no fluxograma da FIG. 3.6.

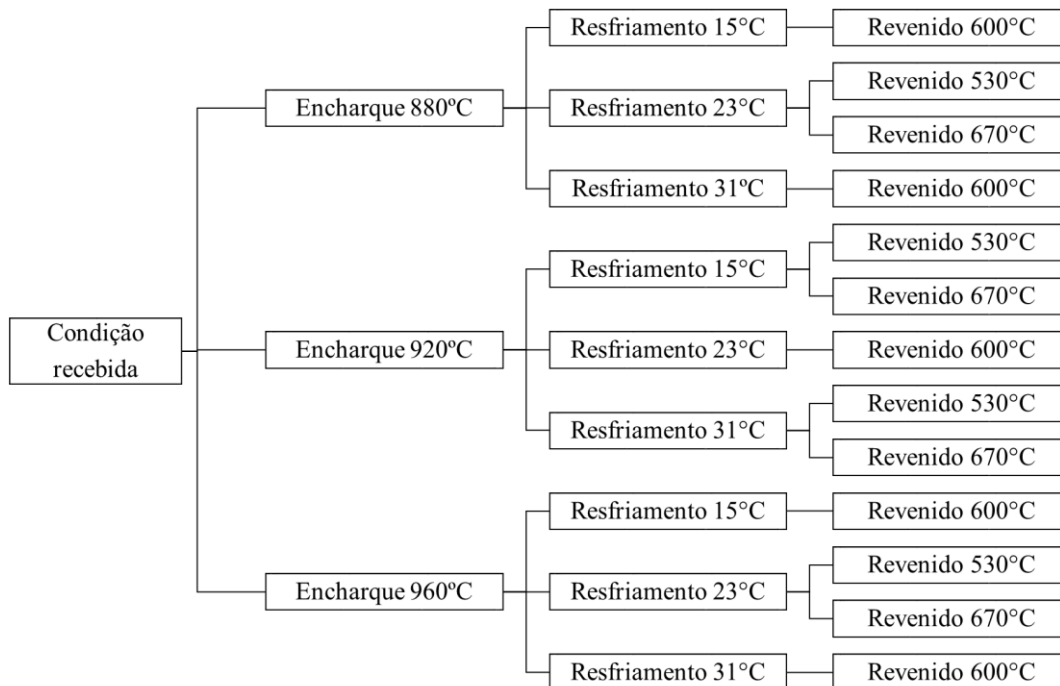


FIG. 3.6 Fluxograma das rotas de tratamento térmico realizadas para a têmpera e revenido.

3.2.3 IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS

Deve-se destacar que foram realizados ensaios mecânicos nas amostras revenidas seguindo o delineamento experimental e, também, nas amostras apenas temperadas, ou seja, o modelo matricial mencionado anteriormente é um esboço do roteiro a ser seguido para o Planejamento de *Box-Behnken* atendendo aos tratamentos térmicos de têmpera e revenido em suas situações finais. Além desses experimentos, foram realizados ensaios nas amostras austenitizadas e sucedidas ao resfriamento em água.

Por conta da quantidade considerável de condições de tratamento térmico a serem avaliadas, é imprescindível adotar uma nomenclatura para identificação das amostras em relação aos ciclos térmicos pelas quais estão dispostas. Além disso, é relevante acrescentar o uso de réplicas para análise experimental, pois, além de promover a redução do erro experimental, o emprego de repetições permite aumentar a precisão dos resultados dos parâmetros de interesse. Portanto, réplicas foram incluídas no desenvolvimento deste trabalho.

Inicialmente, não considerando a reprodução de réplicas oriundas dos ensaios mecânicos, concebendo apenas a ocorrência dos tratamentos térmicos, tem-se a distinção dos fabricantes de cada um dos tubos em A e B, onde as amostras recebidas são nomeadas apenas pela letra relacionada ao seu fabricante (FIG. 3.7).

	FABRICANTE A	FABRICANTE B
AMOSTRA RECEBIDA	A	B

FIG. 3.7 Nomenclatura das amostras recebidas.

Em relação as amostras apenas temperadas, isto é, aquelas austenitizadas acompanhadas de resfriamento em água, foram inseridos dois dígitos. O primeiro dígito relacionado à temperatura de encharque e o segundo associado à temperatura da água no resfriamento. Na numeração a ser usada, os números 1, 2 e 3 são referentes à ordem crescente da temperatura de cada parâmetro de tratamento. Na FIG. 3.8 pode ser visualizada a nomenclatura das amostras somente temperadas dos Fabricantes A e B.

TEMPERATURA DE ENCHARQUE	TEMPERATURA DA ÁGUA					
	15°C		23°C		31°C	
880°C	A11	B11	A12	B12	A13	B13
920°C	A21	B21	A22	B22	A23	B23
960°C	A31	B31	A32	B32	A33	B33

FIG. 3.8 Nomenclatura das amostras temperadas.

As amostras temperadas e revenidas através do delineamento experimental adotaram o acréscimo de mais um caractere para identificação: amostras a serem revenidas nas temperaturas de 530, 600 e 670°C receberam o incremento, respectivamente, das letras X, Y e Z. A identificação das amostras temperadas e revenidas do Fabricante A podem ser vistas na FIG. 3.9.

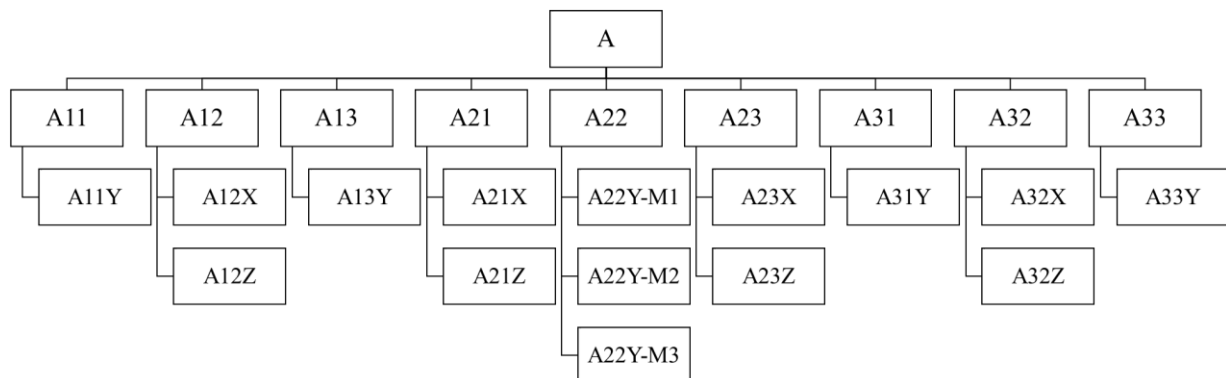


FIG. 3.9 Nomenclatura das amostras temperadas e revenidas do Fabricante A.

Foi assinalado, anteriormente, o princípio de réplicas no ponto central da matriz de experimentos ao realizarmos um delineamento experimental, no qual é imprescindível efetuar, no mínimo, 3 experimentos para validação dos resultados. Por conta disso, as amostras pertinentes às condições intermediárias de cada uma das variáveis foram repetidas, originando o conjunto de amostras A22Y-M1, A22Y-M2 e A22Y-M3, que correspondem aos valores intermediários de cada variável (encharque a 920°C, temperatura da água no resfriamento a 23°C e revenido a 600°C). Diante disso, tem-se a FIG. 3.10 onde pode ser visualizada a identificação das amostras temperadas e revenidas do Fabricante B.

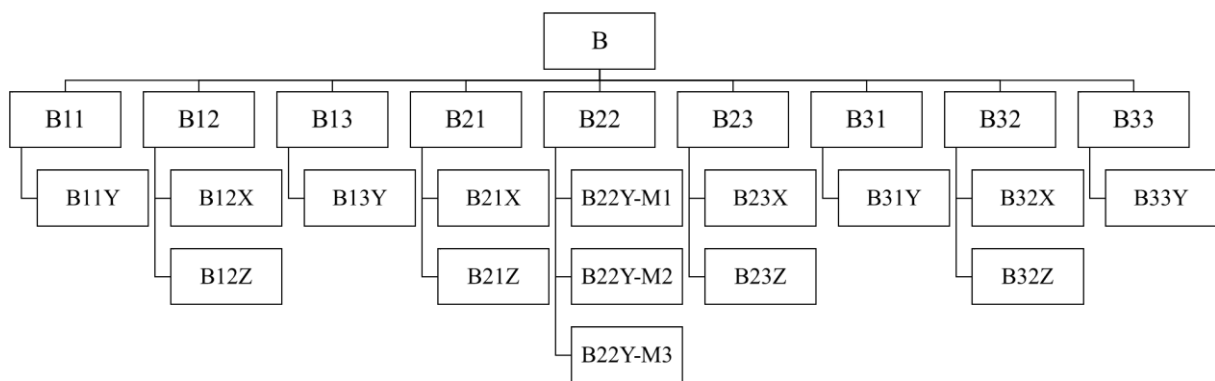


FIG. 3.10 Nomenclatura das amostras temperadas e revenidas do Fabricante B.

3.2.4 ENSAIOS DE TRAÇÃO

Para levantamento das propriedades mecânicas do material como recebido e após os ciclos térmicos nos cupons retirados dos tubos de cada um dos fabricantes, as usinagens dos corpos de prova de tração com seção cilíndrica (FIG. 3.11) foram realizadas na empresa Tork – Controle Tecnológico de Materiais LTDA.

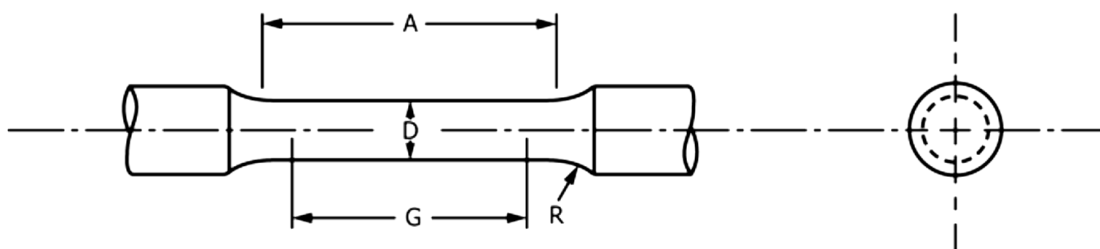


FIG. 3.11 Corpos de prova de tração com seção cilíndrica, norma ASTM A370 (2014).

Os corpos de prova confeccionados atenderam as recomendações das normas API 5L (2012) e as dimensões previstas pela norma ASTM A370 (2014) (TAB. 3.7).

TAB. 3.7 Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração segundo a ASTM A370.

DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA (mm)	
D: diâmetro	8,75 ± 0,18
G: comprimento da seção útil	35 ± 0,1
A: comprimento da seção reduzida	45
R: raio de concordância (mínimo)	6

Fonte: ASTM A370 (2014).

Os ensaios de tração ocorreram no Laboratório de Materiais do Centro Tecnológico do Exército (CTEx), utilizando uma máquina de ensaio da marca MTS, modelo 810, com controle por computador e capacidade para 100 kN (FIG. 3.12).

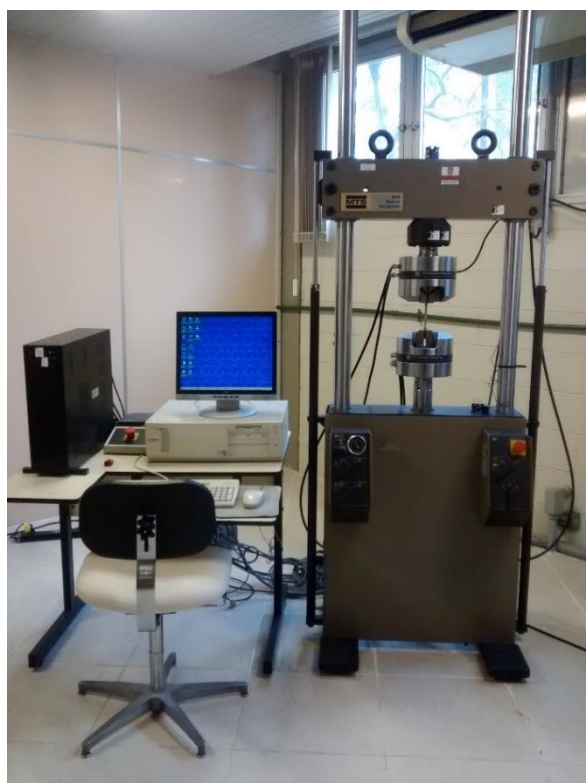


FIG. 3.12 Equipamento de ensaio de tração MTS 810 utilizado para os ensaios de propriedades mecânicas.

No total foram realizados 214 ensaios de tração. A organização destes ensaios atendem as condições, até então mencionadas, dos tubos provenientes de cada um dos fabricantes: material como recebido (05 ensaios), apenas temperado (03 ensaios para cada um dos nove tratamentos distintos, totalizando 27 ensaios) e revenido após têmpera (05 ensaios para cada um dos quinze experimentos delineados, totalizando 75 ensaios). A distribuição dos ensaios de tração pode ser visualizada na FIG. 3.13.

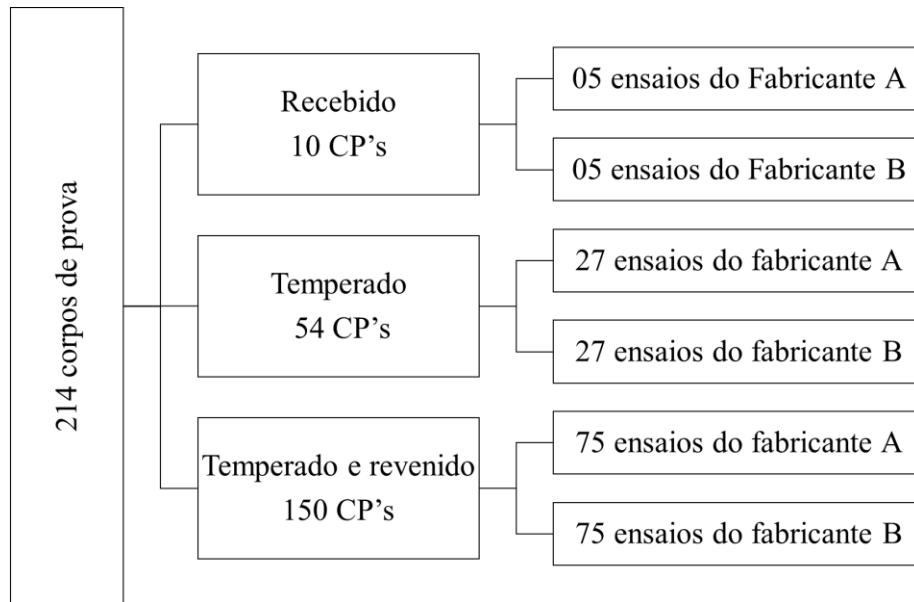


FIG. 3.13 Descrição dos ensaios de tração por número de amostras.

3.2.5 ENSAIOS DE DUREZA

Complementando as análises de resistência mecânica dos tubos, de cada um dos fabricantes, na condição recebida e tratados termicamente, foram realizadas medições de dureza abrangendo as escalas Rockwell B e C através de um equipamento da marca Sussen Wolpert, modelo Testor HT1.

As amostras foram lixadas nas granulometrias de 80, 120, 220, 360, 600 e 1200 mesh e polidas com pasta de diamante de 6, 3 e 1 μm . O ensaio foi realizado com carga de 100 kg e penetrador do tipo esfera de 1/16" para medir na escala Rockwell B; e 150 kg com penetrador de diamante 120° para a escala Rockwell C.

Para cada condição das amostras, de cada um dos fabricantes, foram realizadas 05 medidas de dureza, totalizando 250 medições (FIG. 3.14).

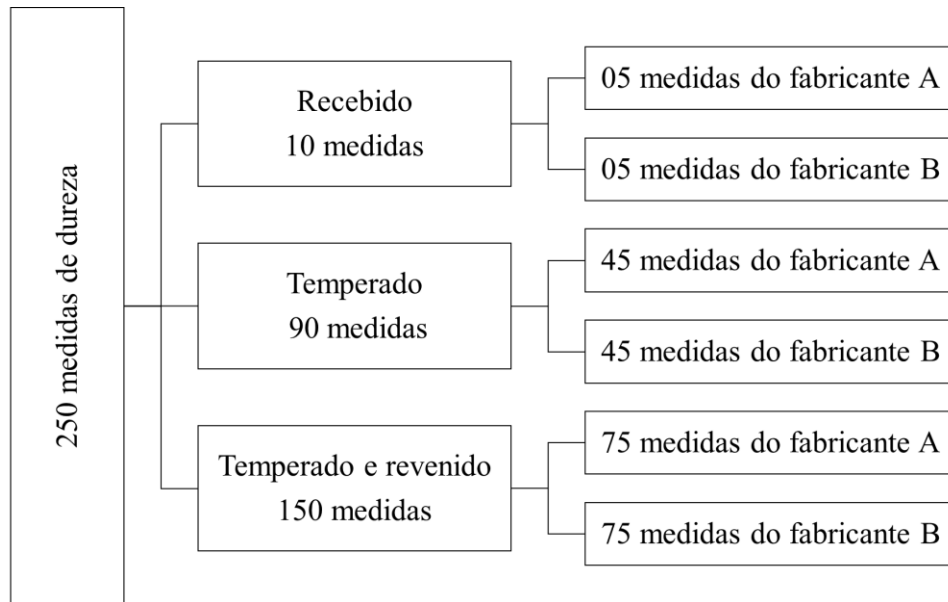


FIG. 3.14 Descrição dos ensaios de dureza por número de amostras.

3.2.6 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Análises microestruturais também foram realizadas em amostras retiradas dos cupons com e sem tratamento térmico. Essas amostras possuíam superfície plana e foram submetidas ao lixamento nas granulometrias de 80, 120, 220, 360, 600 e 1200 *mesh* e ao polimento com pasta de diamante de 6, 3 e 1 μm , sendo posteriormente atacadas quimicamente com Nital 2% (2% de ácido nítrico em 98% de álcool etílico absoluto, p.a.) por, aproximadamente, 30 segundos. O ataque foi interrompido com a lavagem em água, uso de álcool etílico e secagem com jato de ar quente.

Por fim, utilizando um microscópio ótico Olympus, modelo BX60M, do Laboratório de Microscopia do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET-RJ), as imagens das microestruturas foram obtidas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo estão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de tração e dureza, além das análises metalográfica, das amostras recebidas e tratadas termicamente para os tubos dos Fabricantes A e B. Esses dados também foram compilados em modelos matemáticos, que foram validados via regressão, e abordados por inferência estatística dentro do planejamento experimental proposto nesta dissertação. Também são detalhadas avaliações das propriedades mecânicas em função das variáveis de tratamento térmico para os tubos de cada um dos fabricantes.

4.1 ENSAIOS DE TRAÇÃO

Os ensaios de tração realizados nas amostras em condição recebida e nas tratadas termicamente permitem realizar o levantamento de algumas grandezas associadas à resistência mecânica e ductilidade dos tubos dos Fabricantes A e B, como limite de escoamento (LE), limite de resistência à tração (LR) e alongamento percentual (AL).

O alongamento percentual (A_f) previsto pela norma API 5L (2012) para a classe de tubos X65 deve ser calculado através da EQ. 4.1, onde A_{xc} é a área da seção transversal aproximada, em mm², U é o limite de resistência à tração mínimo, em MPa, e A_f deve ser expresso em percentual arredondando para o inteiro mais próximo. O alongamento mínimo esperado na norma API 5L (2012) para corpos de prova de seção cilíndrica com 8,75 mm de diâmetro é de 18%.

$$A_f = 1940 + \frac{A_{xc}^{0,2}}{U^{0,9}} \quad \text{EQ. 4.1}$$

Os valores de limite de escoamento, resistência à tração e alongamento percentual são abordados como forma de monitorar a influência dos tratamentos térmicos nas propriedades mecânicas do tubo de cada fabricante. Como os ensaios mecânicos demandam réplicas, o intervalo de confiança (IC) desses valores foram obtidas a partir da distribuição *t-Student* com

nível de significância de 5% Complementarmente, esses valores das amostras na condição recebida e revenidas foram comparados aos requisitos estabelecidos pela norma API 5L (2012), descritos na FIG. 4.1.

Limite de escoamento (MPa)		Limite de resistência à tração (MPa)		Alongamento (%)
Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
450	600	535	760	EQ. 4.1

FIG. 4.1 Valores de limite de escoamento, limite de resistência à tração e alongamento percentual requisitados pela norma API 5L X65 (2012).

4.1.1 FABRICANTE A

4.1.1.1 AMOSTRAS RECEBIDAS

Amostras do tubo do Fabricante A foram extraídas na condição como recebida para referenciar a influência dos tratamentos térmicos nos valores de limite de escoamento, de resistência à tração e alongamento percentual previstos pela norma API 5L (2012), de acordo com o que pode ser visualizado na TAB. 4.1.

TAB. 4.1 Resultados das propriedades mecânicas das amostras recebidas do Fabricante A.

AMOSTRAS RECEBIDAS	LE (MPa)	LR (MPa)	AL (%)
A-I	460,74	558,07	22,38
A-II	460,29	546,12	22,51
A-III	481,05	567,97	23,12
A-IV	477,11	561,12	20,10
A-V	458,96	550,44	23,50
A – Média e IC	467,63 ± 13,12	556,75 ± 10,74	22,32 ± 1,65

Fonte: Autor.

As amostras recebidas do Fabricante A possuem valores de média amostral e do intervalo de confiança com relação ao limite de escoamento, limite de resistência à tração e alongamento percentual dentro das especificações da norma API 5L (2012).

4.1.1.2 AMOSTRAS TEMPERADAS

As propriedades mecânicas das amostras tratadas em temperatura de encharque de 880°C em diferentes temperaturas de resfriamento em água foram levantadas e seus resultados estão exibidos na TAB. 4.2, onde é possível observar que os ensaios foram replicados e o resultado final é o valor médio com sua devida dispersão para cada grupo amostral.

TAB. 4.2 Resultados das propriedades mecânicas das amostras temperadas a partir de 880°C do Fabricante A.

AMOSTRAS TEMPERADAS	LE (MPa)	LR (MPa)	AL (%)
A11-I	467,29	730,65	21,81
A11-II	488,57	736,88	21,21
A11-III	474,84	720,81	20,15
A11 - Média e IC	476,90 ± 26,81	729,45 ± 20,12	21,06 ± 2,09
A12-I	460,29	696,69	22,94
A12-II	440,47	694,53	21,02
A12-III	447,91	693,28	20,18
A12 – Média e IC	449,56 ± 24,87	694,84 ± 4,29	21,38 ± 3,52
A13-I	460,64	704,83	20,86
A13-II	456,09	698,25	21,17
A13-III	460,99	700,30	21,94
A13 – Média e IC	459,24 ± 6,79	701,13 ± 8,36	21,32 ± 1,38

Fonte: Autor.

Em termos de resistência mecânica, as médias apresentam maiores valores para as amostras submetidas a menor temperatura de resfriamento. Entretanto, o intervalo de confiança sugere uma menor discrepância entre os resultados. Tratando-se de alongamento percentual, todas as amostras retratam médias próximas.

Já na TAB. 4.3 podem ser visualizadas as propriedades mecânicas das amostras austenitizadas em 920°C e resfriadas em água nas temperaturas estipuladas de 15, 23 e 31°C.

TAB. 4.3 Resultados das propriedades mecânicas das amostras temperadas a partir de 920°C do Fabricante A.

AMOSTRAS TEMPERADAS	LE (MPa)	LR (MPa)	AL (%)
A21-I	616,33	849,44	13,91
A21-II	573,67	840,42	14,51
A21-III	583,78	800,29	13,53
A21 – Média e IC	591,26 ± 55,37	830,05 ± 65,00	13,99 ± 1,23
A22-I	557,26	780,63	15,76
A22-II	517,81	790,58	16,40
A22-III	539,08	803,61	16,85
A22 – Média e IC	538,05 ± 49,05	791,61 ± 28,63	16,34 ± 1,36
A23-I	562,35	802,52	14,18
A23-II	597,25	761,85	14,09
A23-III	570,27	782,25	13,17
A23 – Média e IC	576,62 ± 45,45	782,21 ± 50,52	13,81 ± 1,38

Fonte: Autor.

Para maiores resfriamentos o limite de resistência à tração se mostra ligeiramente maior considerando o valor médio obtido, mas levando em conta o intervalo de confiança, as amostras possuem dados similares para as diferentes temperaturas de resfriamento em água. Os resultados de limite de escoamento são semelhantes para as diversas condições de resfriamento, observando-se a média e o intervalo de confiança. Entretanto, as amostras resfriadas a 23°C apresentaram valor médio de alongamento percentual um pouco acima das demais.

Os dados de limite de escoamento, resistência à tração e alongamento das amostras temperadas a 960°C e resfriadas em água em diferentes temperaturas podem ser visualizados na TAB. 4.4.

TAB. 4.4 Resultados das propriedades mecânicas das amostras temperadas a partir de 960°C do Fabricante A.

AMOSTRAS TEMPERADAS	LE (MPa)	LR (MPa)	AL (%)
A31-I	515,37	690,96	19,31
A31-II	490,71	690,65	19,65
A31-III	503,35	658,86	19,42
A31 – Média e IC	503,14 ± 30,63	680,16 ± 45,82	19,46 ± 0,43
A32-I	504,29	685,32	17,41
A32-II	508,18	670,52	20,88
A32-III	495,60	682,89	20,21
A32 – Média e IC	502,69 ± 16,00	679,57 ± 19,72	19,50 ± 4,57
A33-I	515,64	675,72	17,04
A33-II	526,51	725,85	15,79
A33-III	539,25	685,45	19,97
A33 – Média e IC	527,13 ± 29,35	695,67 ± 66,03	17,60 ± 5,33

Fonte: Autor.

No que se refere à resistência mecânica, as amostras austenitizadas em 960°C e resfriadas nas temperaturas de 15 e 23°C apontam médias com valores semelhantes, enquanto os resultados das amostras austenitizadas em 960°C e resfriadas em 31°C exibem maior valor de média. Entretanto, o intervalo de confiança indica que os três grupos amostrais podem apresentar valores similares de resistência mecânica, apesar da dispersão de alongamento percentual das amostras resfriadas em água com temperatura de 23°C ser ligeiramente maior em relação as demais.

4.1.1.3 AMOSTRAS REVENIDAS

Compreendendo as análises de tratamento térmico, temos as condições de tratamento térmico de têmpera e revenido modeladas seguindo o Planejamento de *Box-Benhken* e, a partir disto, comparadas com os dados previstos pela norma API 5L (2012) como forma de apuração com respeito às propriedades mecânicas constantes na norma dos tubos de grau X65.

Na TAB. 4.5 podem ser visualizados os valores de limite de escoamento para as amostras revenidas do Fabricante A nas diferentes rotas térmicas previstas. Avaliando os resultados dos conjuntos amostrais listados, pode-se indicar quais destes estão de acordo com o previsto pela norma API 5L (2012) – neste caso, 450 até 600 MPa. As famílias amostrais A23X e A23Z não expressam resultados correspondentes ao previsto por norma, pois enquanto a série amostral A23X apresenta valor máximo superior ao estipulado, a amostra A23Z se comporta de maneira oposta com limite de escoamento abaixo do valor mínimo convencionado. Já as amostras A12Z, A22Y-M1, A22Y-M2, A22Y-M3, A32Z e A33Y exprimem média amostral dentro do estipulado por norma, embora ao menos um dos valores dos seus limites de confiança não condizer com os normatizados. Enfim, têm-se as séries de amostras A11Y, A12X, A13Y, A21X, A21Z, A31Y e A32X, nas quais suas médias amostrais e respectivos limites de confiança exprimem conformidade com os requisitos da API 5L (2012). A FIG. 4.2 permite perceber esses resultados de forma gráfica.

TAB. 4.5 Resultados do Limite de escoamento (LE) das amostras revenidas do Fabricante A.

AMOSTRAS REVENIDAS	LIMITE DE ESCOAMENTO – LE (MPa)					Média e IC
	I	II	III	IV	V	
A11Y	518,79	507,33	497,05	524,11	499,31	509,32 ± 14,73
A12X	510,52	528,34	504,58	526,15	511,41	516,20 ± 12,97
A12Z	441,92	447,57	463,23	452,36	458,00	452,61 ± 10,41
A13Y	517,05	507,57	505,93	540,87	492,66	512,81 ± 22,26
A21X	576,76	588,53	573,68	571,53	583,55	578,81 ± 8,79
A21Z	495,26	499,99	497,11	455,51	470,11	483,60 ± 24,51
A22Y – M1	589,10	595,03	606,62	598,71	605,17	598,93 ± 9,00
A22Y – M2	601,46	598,70	604,78	589,92	593,79	597,73 ± 7,37
A22Y – M3	609,77	564,23	606,18	620,86	593,34	598,88 ± 26,96
A23X	598,18	621,75	647,82	618,97	639,24	625,19 ± 23,96
A23Z	408,92	393,71	414,27	395,03	423,62	407,09 ± 15,84
A31Y	547,25	551,30	535,02	560,70	564,12	551,68 ± 14,34
A32X	555,12	516,64	521,04	533,08	529,21	531,02 ± 18,57
A32Z	446,87	464,00	452,20	481,72	473,93	463,74 ± 18,05
A33Y	559,47	618,11	598,36	619,86	591,61	597,48 ± 30,45

Fonte: Autor.

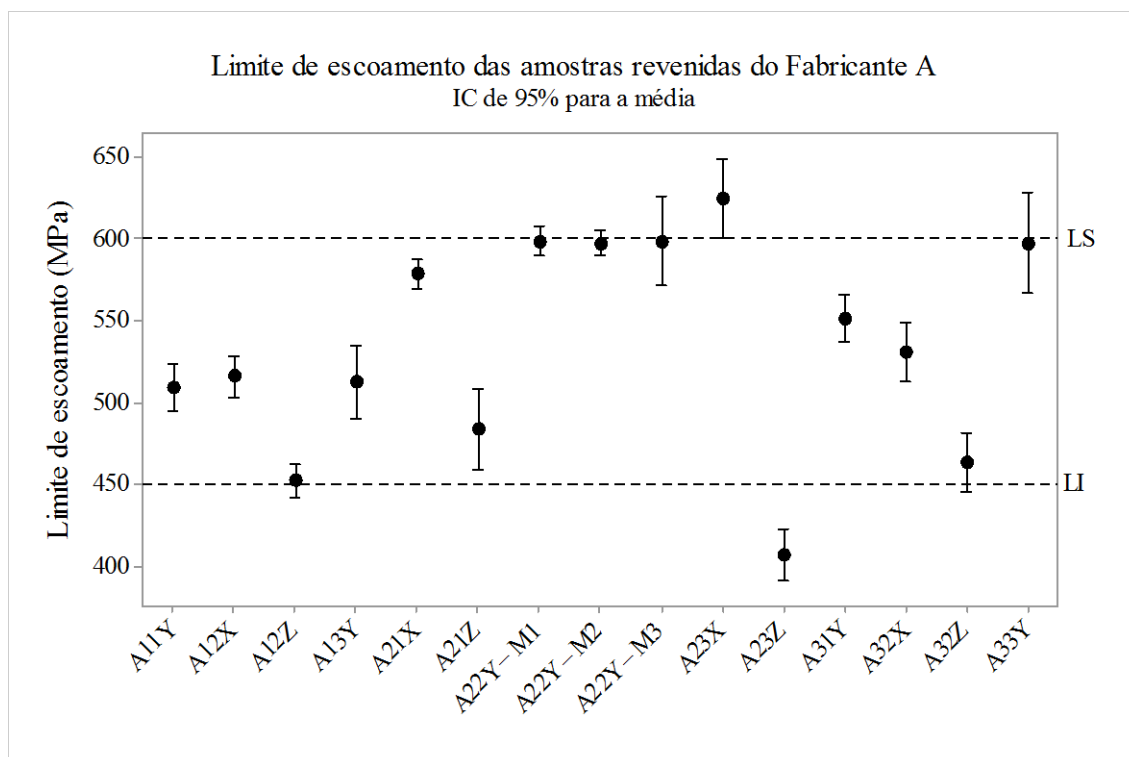


FIG. 4.2 Limite de escoamento das amostras revenidas do Fabricante A. IC: Intervalo de confiança. Limite superior (LS) e Limite inferior (LI) da norma API 5L X65 (2012).

Complementando as avaliações de resistência mecânica, na TAB. 4.6 constam os valores de limite de resistência à tração para cada um dos grupos amostrais delineados experimentalmente para o Fabricante A. Dessa forma, é possível relacionar os dados obtidos com os estabelecidos pela API 5L (2012) – que para este atributo estão entre 535 e 760 MPa.

A maioria dos agrupamentos amostrais apresenta resultados dentro do normatizado, com exceção das séries amostrais A12Z e A23Z, nas quais se verifica que pelo um dos seus limites de confiança não está em conformidade com os valores requisitados pela API 5L (2012). Esses dados estão sintetizados na FIG. 4.3.

TAB. 4.6 Resultados do Limite de resistência à tração (LR) das amostras revenidas do Fabricante A.

AMOSTRAS REVENIDAS	LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO – LR (MPa)					Média e IC
	I	II	III	IV	V	
A11Y	594,13	587,51	576,23	599,51	577,77	587,03 ± 12,55
A12X	599,95	615,85	597,28	611,26	605,12	605,89 ± 9,58
A12Z	519,92	522,61	537,15	525,34	532,87	527,58 ± 8,95
A13Y	597,32	575,43	586,49	617,07	577,73	590,81 ± 21,13
A21X	658,63	677,08	662,40	663,67	673,50	667,06 ± 9,74
A21Z	574,70	582,34	570,27	540,46	554,86	564,53 ± 20,84
A22Y – M1	673,92	681,87	688,34	674,77	682,75	680,33 ± 7,46
A22Y – M2	675,86	677,92	672,81	667,27	670,82	672,94 ± 5,19
A22Y – M3	682,97	645,38	687,39	693,95	668,02	675,54 ± 24,05
A23X	675,15	695,71	714,30	687,94	712,17	697,05 ± 20,50
A23Z	494,84	516,81	507,93	519,60	488,49	505,53 ± 16,84
A31Y	629,69	644,05	626,47	641,98	649,73	638,38 ± 12,28
A32X	642,71	621,60	619,30	630,01	649,33	632,59 ± 16,27
A32Z	556,84	565,55	563,20	584,97	577,22	569,55 ± 14,08
A33Y	642,62	700,25	677,79	692,37	676,27	677,86 ± 27,46

Fonte: Autor.

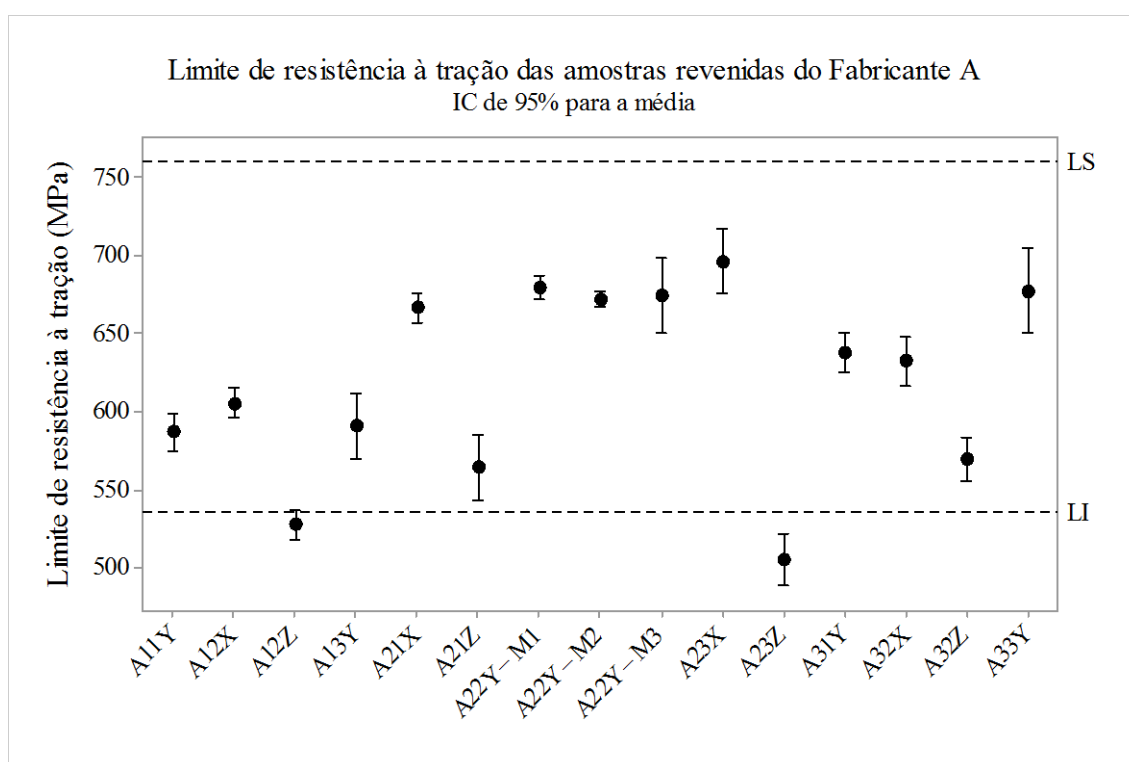


FIG. 4.3 Limite de resistência à tração das amostras revenidas do Fabricante A. IC: Intervalo de confiança. Limite superior (LS) e Limite inferior (LI) da norma API 5L X65 (2012).

Por sua vez, o alongamento percentual é um atributo de ductilidade prenunciado na norma API 5L (2012) visando atender uma das condições de projeto para as quais os tubos devem estar em conformidade. Diferentemente da prescrição de valores em limite superior e inferior, a exemplo do que ocorre com os valores de resistência mecânica, a normatização de alongamento percentual dos tubos API 5L é definida por um valor mínimo a ser atendido, e neste caso deve ser de no mínimo 18%. Seguindo o delineamento experimental, os dados de alongamento percentual foram levantados e estão listados na TAB. 4.7. De todas as séries amostrais, os grupos A21X, A22Y-M1, A22Y-M2, A22Y-M3, A23X, A31Y, A32X e A33Y possuem ao menos um dos intervalos de confiança abaixo do requisitado e, portanto, não obedecem ao mínimo estabelecido pela norma. Na FIG. 4.4 são exibidos graficamente os resultados.

TAB. 4.7 Resultados do Alongamento percentual (AL) das amostras revenidas do Fabricante A.

AMOSTRAS REVENIDAS	ALONGAMENTO PERCENTUAL – AL (%)					Média e IC
	I	II	III	IV	V	
A11Y	23,77	23,02	22,01	21,36	23,33	22,70 ± 1,23
A12X	22,18	19,97	22,20	19,34	22,27	21,19 ± 1,76
A12Z	24,65	24,27	24,07	25,53	24,70	24,64 ± 0,70
A13Y	22,85	23,90	22,15	20,78	22,09	22,35 ± 1,42
A21X	16,28	16,29	16,37	15,95	17,06	16,39 ± 0,51
A21Z	21,23	19,60	21,61	22,09	22,44	21,39 ± 1,37
A22Y-M1	17,58	17,82	19,42	18,15	18,49	18,29 ± 0,89
A22Y-M2	18,94	19,37	18,87	18,64	17,43	18,65 ± 0,91
A22Y-M3	17,69	18,11	17,54	17,03	18,15	17,70 ± 0,57
A23X	17,76	16,99	16,44	17,75	16,16	17,02 ± 0,91
A23Z	25,93	21,93	22,06	24,55	24,99	23,89 ± 2,24
A31Y	16,45	16,62	19,69	16,82	18,86	17,69 ± 1,84
A32X	13,08	19,42	16,22	17,61	17,27	16,72 ± 2,90
A32Z	24,98	20,67	22,65	19,69	21,63	21,92 ± 2,52
A33Y	18,45	16,69	16,79	16,76	15,19	16,78 ± 1,43

Fonte: Autor.

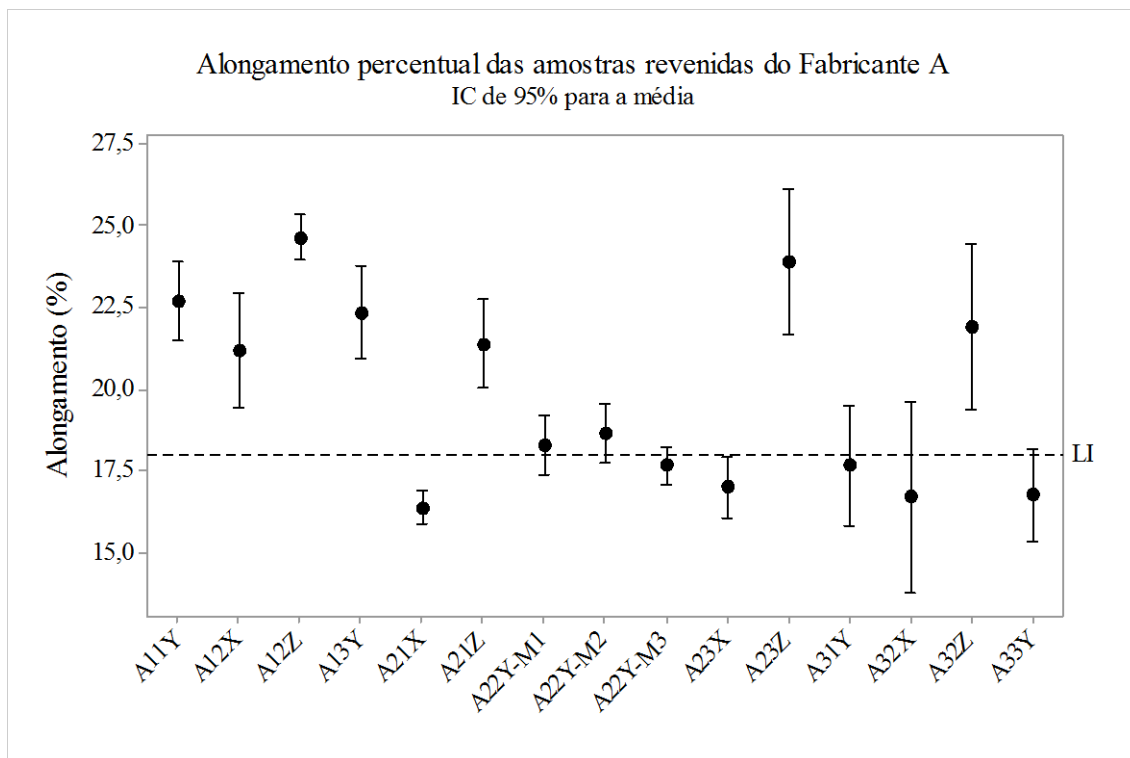


FIG. 4.4 Alongamento percentual das amostras revenidas do Fabricante A. IC: Intervalo de confiança. Limite inferior (LI) da norma API 5L X65 (2012).

Por fim, ao avaliar os resultados das amostras do Fabricante A nas condições revenidas propostas é possível concluir que as séries amostrais A11Y, A12X, A13Y e A21Z atendem aos requisitos previstos na norma API 5L tratando-se das propriedades de limite de escoamento, limite de resistência à tração e alongamento percentual.

4.1.2 FABRICANTE B

4.1.2.1 AMOSTRAS RECEBIDAS

Amostras do tubo do Fabricante B na condição recebida foram preparadas para ensaio de tração a fim de levantar as propriedades mecânicas para verificar conformidade em relação aos valores previstos pela norma API 5L (2012) e observar a influência dos tratamentos térmicos no desempenho mecânico no tubo do mesmo. Os resultados estão na TAB. 4.8.

TAB. 4.8 Resultados das propriedades mecânicas das amostras recebidas do Fabricante B.

AMOSTRAS RECEBIDAS	LE (MPa)	LR (MPa)	AL (%)
B-I	471,80	541,98	23,43
B-II	449,78	521,55	22,87
B-III	447,56	515,90	23,91
B-IV	459,30	533,26	25,38
B-V	464,40	534,39	22,62
B – Média e IC	458,57 ± 12,54	529,42 ± 13,05	23,64 ± 1,36

Fonte: Autor.

Discorrendo acerca do limite de escoamento, a média amostral está dentro do especificado, no entanto, ao apreciar o intervalo de confiança, os valores flutuam para abaixo do previsto. Enquanto o limite de resistência à tração, ao considerar a média e os limites do intervalo de confiança, ambos não apresentam valores para normatização. Por outro lado, o alongamento percentual expõe conformidade, uma vez que a média e dispersão estão acima do mínimo normatizado, o que, no entanto, esta condição não é suficiente para conferir conformidade à norma.

4.1.2.2 AMOSTRAS TEMPERADAS

Na TAB. 4.9 são exibidas as medidas de propriedades mecânicas para as amostras temperadas a partir de 880°C em diferentes temperaturas de resfriamento em água.

TAB. 4.9 Resultados das propriedades mecânicas das amostras temperadas a partir de 880°C do Fabricante B.

AMOSTRAS TEMPERADAS	LE (MPa)	LR (MPa)	AL (%)
B11-I	292,05	608,91	27,17
B11-II	291,24	614,85	28,01
B11-III	281,88	601,46	25,82
B11 – Média e IC	288,39 ± 14,03	608,41 ± 16,67	27 ± 2,74
B12-I	321,64	631,27	23,47
B12-II	314,05	616,75	25,07
B12-III	286,93	606,79	25,78
B12 – Média e IC	307,54 ± 45,32	618,27 ± 30,58	24,77 ± 2,94
B13-I	281,89	609,96	24,39
B13-II	284,21	605,68	24,89
B13-III	272,44	598,80	25,76
B13 – Média e IC	279,52 ± 15,49	604,81 ± 13,98	25,01 ± 1,73

Fonte: Autor.

A interpretação dos limites de confiança dos resultados de ensaios de tração das amostras aponta pouca diferença entre os valores obtidos, apesar de ser possível observar pequenas variações nos valores médios dos mesmos, sendo mais desejáveis os valores médios decorrentes do resfriamento com água em 23°C.

Os dados dos limites de escoamento, de resistência à tração e de alongamento percentual das amostras austenitizadas a partir de 920°C e resfriadas em água em distintas temperaturas, estão listados na TAB. 4.10.

TAB. 4.10 Resultados das propriedades mecânicas das amostras temperadas a partir de 920°C do Fabricante B.

AMOSTRAS TEMPERADAS	LE (MPa)	LR (MPa)	AL (%)
B21-I	321,26	604,37	21,49
B21-II	329,93	611,12	24,09
B21-III	337,52	613,58	23,61
B21 – Média e IC	329,57 ± 20,21	609,69 ± 11,84	23,06 ± 3,44
B22-I	351,53	612,47	23,96
B22-II	353,93	614,48	23,08
B22-III	352,42	624,37	21,34
B22 – Média e IC	352,63 ± 3,02	617,11 ± 15,81	22,79 ± 3,31
B23-I	318,98	606,15	23,51
B23-II	323,78	608,79	24,10
B23-III	348,29	623,84	24,07
B23 – Média e IC	330,35 ± 39,05	612,92 ± 23,70	23,89 ± 0,82

Fonte: Autor.

Os resultados para as amostras austenitizadas em 920°C apresentam diferentes valores médios, sendo os mais elevados encontrados nas amostras submetidas ao resfriamento a 23°C, entretanto, quando considerado o intervalo de confiança é possível perceber que não há diferença entre os dados, indicando similaridade entre eles.

As propriedades mecânicas das amostras temperadas a partir de 960°C e resfriadas em água nas temperaturas de 15, 23 e 31°C são expostas na TAB. 4.11.

TAB. 4.11 Resultados das propriedades mecânicas das amostras temperadas a partir de 960°C do Fabricante B.

AMOSTRAS TEMPERADAS	LE (MPa)	LR (MPa)	AL (%)
B31-I	409,75	631,95	20,44
B31-II	409,34	631,54	20,49
B31-III	410,90	647,77	20,96
B31 – Média e IC	410,00 ± 2,00	637,09 ± 22,98	20,63 ± 0,72
B32-I	411,18	613,78	20,44
B32-II	412,54	623,87	20,27
B32-III	407,66	628,64	21,29
B32 – Média e IC	410,46 ± 6,26	622,10 ± 18,85	20,67 ± 1,36
B33-I	398,60	612,91	20,40
B33-II	401,38	616,80	19,53
B33-III	418,67	629,48	20,56
B33 – Média e IC	406,22 ± 27,01	619,73 ± 21,51	20,16 ± 1,38

Fonte: Autor.

Para as amostras temperadas a partir de 960°C, os resultados de ensaios de propriedades mecânicas também não apontam diferença entre os resultados obtidos para as diferentes temperaturas de resfriamento, quando o intervalo de confiança é considerado. Os valores das médias resultantes dos diferentes tratamentos são ligeiramente maiores nas amostras submetidas às menores temperaturas de resfriamento.

4.1.2.3 AMOSTRAS REVENIDAS

Perfazendo as análises das amostras temperadas e revenidas através da utilização de delineamento experimental, foram levantados os dados de limite de escoamento, limite de resistência à tração e alongamento percentual das amostras conforme método de *Box-Behnken* de forma similar ao aplicado para as amostras do Fabricante A. Ademais, tais resultados serão confrontados com os regulamentados pela API 5L (2012) para averiguar conformidade dos tratamentos realizados com os estabelecidos por norma.

Os valores de limite de escoamento das amostras revenidas do Fabricante B seguindo o arranjo experimental prenunciado são exibidos na TAB. 4.12. A maioria dos grupos amostrais não apresenta conformidade com a norma API 5L (2012) em relação aos valores de limite de escoamento, haja vista que os dados dos limites de confiança encontram-se fora do estipulado por norma. Em torno disto, ressalta-se que as séries amostrais B23X e B32Z possuem pelo menos um dos limites de dispersão incluso no normatizado pela API, o que não é suficiente para atribuir conformidade à norma. Destacam-se ainda nestas observações as séries B31Y,

B32X e B33Y, onde as médias e as margens de limite de confiança verificadas estão dentro do estipulado por norma. A fim de facilitar a análise desses resultados, foi elaborado o gráfico da FIG. 4.5.

TAB. 4.12 Resultados do Limite de escoamento (LE) das amostras revenidas do Fabricante B.

AMOSTRAS REVENIDAS	LIMITE DE ESCOAMENTO – LE (MPa)					Média e IC
	I	II	III	IV	V	
B11Y	410,64	412,66	418,09	413,09	405,44	411,98 ± 5,68
B12X	392,15	384,67	369,97	374,72	370,23	378,35 ± 12,09
B12Z	421,06	422,69	410,78	414,45	413,27	416,45 ± 6,41
B13Y	417,17	397,78	400,34	403,66	405,55	404,90 ± 9,29
B21X	439,30	433,86	446,75	434,62	434,53	437,81 ± 6,76
B21Z	412,92	401,78	393,48	398,12	403,39	401,94 ± 8,97
B22Y – M1	421,24	433,09	436,23	416,14	419,29	425,20 ± 11,05
B22Y – M2	448,23	437,30	431,53	419,96	424,66	432,33 ± 13,74
B22Y – M3	445,95	426,73	437,09	423,88	428,14	432,36 ± 11,25
B23X	466,54	452,40	441,87	449,39	447,17	451,47 ± 11,50
B23Z	359,45	400,95	380,03	355,59	390,90	377,38 ± 24,38
B31Y	494,91	476,23	466,75	469,88	470,11	475,58 ± 14,08
B32X	463,59	485,73	471,57	470,06	480,95	474,38 ± 11,02
B32Z	438,91	454,33	441,28	437,79	442,65	442,99 ± 8,22
B33Y	467,59	464,95	470,36	464,73	481,99	469,92 ± 8,85

Fonte: Autor.

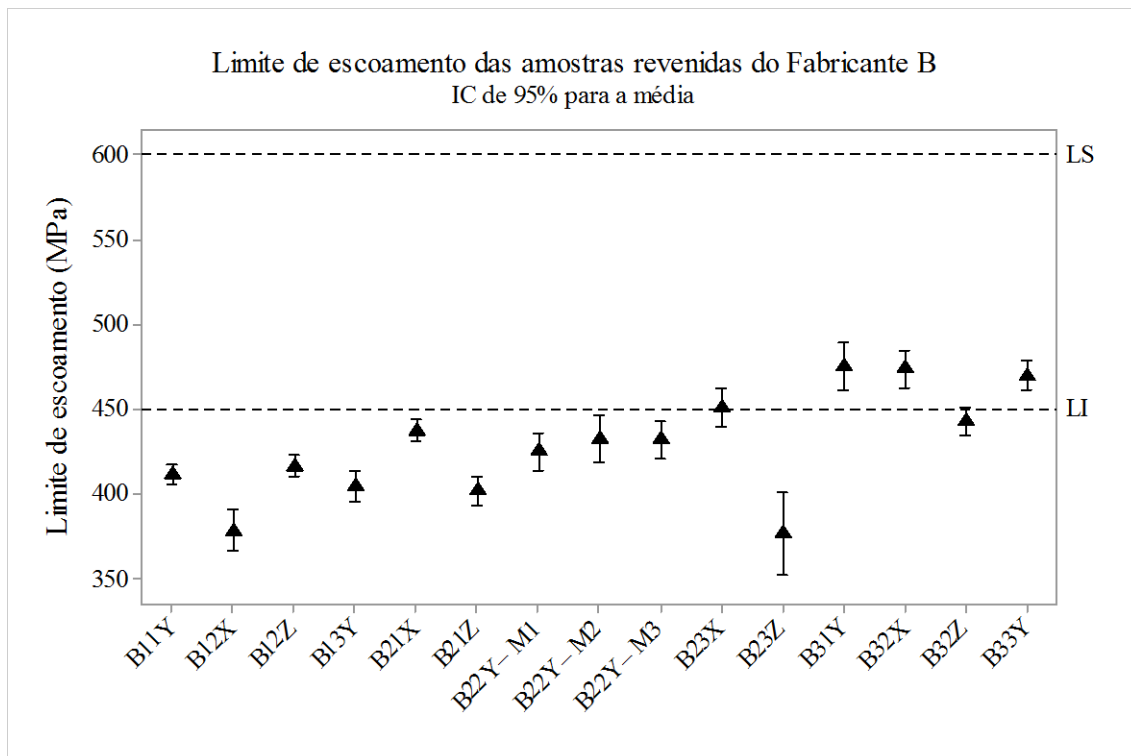


FIG. 4.5 Limite de escoamento das amostras revenidas do Fabricante B. IC: Intervalo de confiança. Limite superior (LS) e Limite inferior (LI) da norma API 5L X65 (2012).

Integrando as análises de resistência mecânica associadas aos tratamentos de têmpera e revenido, a TAB. 4.13 dispõe de informações do limite de resistência à tração das amostras tratadas termicamente respeitando o delineamento experimental proposto. Existe prevalência de não conformidade das famílias de amostras revenidas com os valores preconizados pela norma API 5L (2012). Todavia, ao averiguar os dados das séries amostrais B31Y, B32X e B33Y constata-se compatibilidade dos resultados com os valores normatizados. Por fim, é importante ressaltar que os grupos amostrais B21X, B23X e B23Z apresentam, em pelo menos um dos seus limites de confiança, requisitos ao que a norma determina, entretanto, esta circunstância é insatisfatória para validação com os valores previstos pela API 5L (2012). A FIG. 4.6 exhibe esses dados de forma gráfica.

TAB. 4.13 Resultados do Limite de resistência à tração (LR) das amostras revenidas do Fabricante B.

AMOSTRAS REVENIDAS	LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO – LR (MPa)					Média e IC
	I	II	III	IV	V	
B11Y	488,10	491,89	490,63	488,26	484,10	488,60 ± 3,70
B12X	470,89	462,14	460,21	449,20	460,27	460,54 ± 9,58
B12Z	520,23	521,84	513,09	514,27	512,57	516,40 ± 5,36
B13Y	496,83	480,79	484,35	490,20	491,14	488,66 ± 7,75
B21X	532,72	530,02	540,30	528,22	534,40	533,13 ± 5,79
B21Z	479,25	477,03	470,70	475,14	476,91	475,81 ± 3,98
B22Y – M1	497,29	512,03	514,40	498,43	499,77	504,38 ± 10,12
B22Y – M2	533,05	522,96	515,52	496,25	502,04	513,96 ± 18,66
B22Y – M3	527,29	509,58	522,18	505,06	505,67	513,95 ± 12,61
B23X	561,53	547,00	528,84	531,49	530,30	539,83 ± 17,60
B23Z	466,84	486,65	481,90	476,30	484,24	479,18 ± 9,81
B31Y	584,11	575,04	563,38	567,38	564,28	570,84 ± 10,83
B32X	561,59	589,22	575,38	570,56	580,58	575,46 ± 12,90
B32Z	528,24	542,11	530,99	526,33	530,98	531,73 ± 7,61
B33Y	567,89	568,87	573,64	568,17	580,78	571,87 ± 6,83

Fonte: Autor.

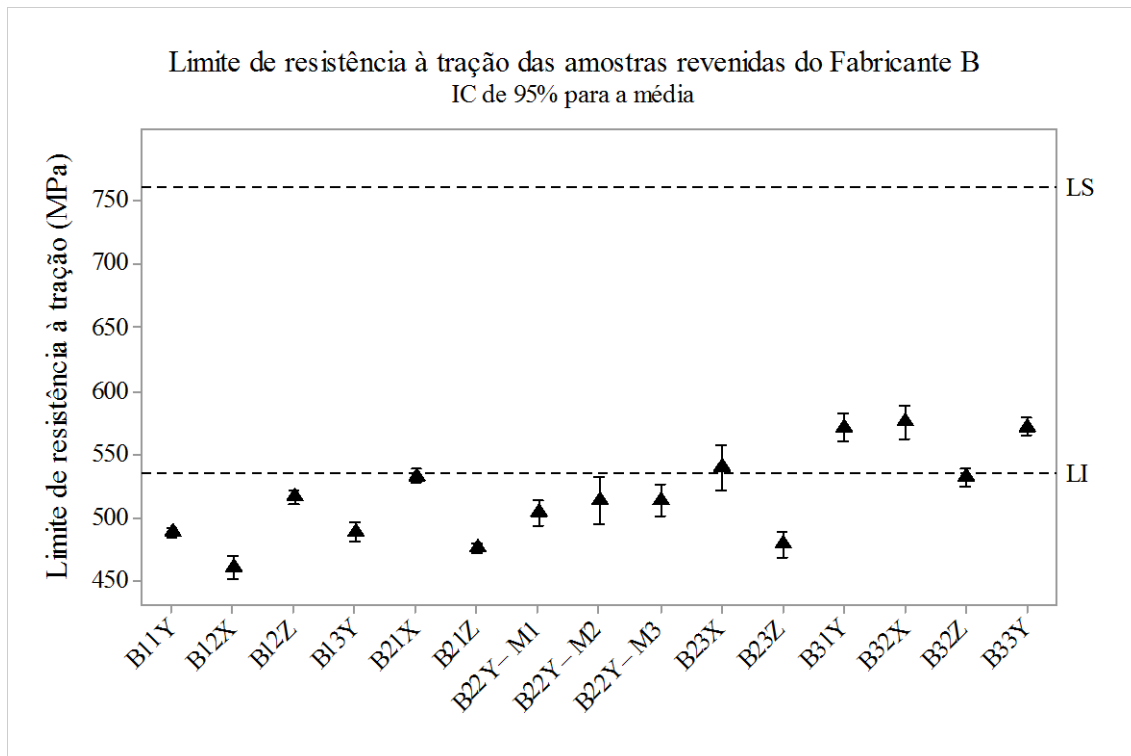


FIG. 4.6 Limite de resistência à tração das amostras revenidas do Fabricante B. IC: Intervalo de confiança. Limite superior (LS) e Limite inferior (LI) da norma API 5L X65 (2012).

Completando as análises das amostras temperadas e revenidas por meio do planejamento experimental, são levantados os parâmetros de alongamento percentual, conforme pode ser visualizado na TAB. 4.14. Diferentemente das avaliações referentes à resistência mecânica, nas quais a maioria dos grupos amostrais se encontram não conformes, todos os resultados obtidos em termos de alongamento percentual se mostram adequados no que se refere à normatização na API 5L (2012). Esta clássica relação inversa entre resistência e ductilidade (neste caso, representado pelo parâmetro de alongamento percentual) é bastante conhecida e tratada como uns dos grandes desafios no que concerne ao aumento simultâneo de tais propriedades no desenvolvimento de aços de alta resistência. A correlação entre alongamento percentual dessas amostras com os valores normatizados pode ser visualizada através da FIG. 4.7.

TAB. 4.14 Resultados do Alongamento percentual (AL) das amostras revenidas do Fabricante B.

AMOSTRAS REVENIDAS	ALONGAMENTO PERCENTUAL – AL (%)					Média e IC
	I	II	III	IV	V	
B11Y	27,21	28,23	29,61	28,12	28,73	28,38 ± 1,09
B12X	29,63	32,02	32,16	31,13	32,00	31,39 ± 1,32
B12Z	26,81	28,92	27,89	28,28	27,07	27,79 ± 1,07
B13Y	28,03	28,00	28,20	28,40	26,77	27,88 ± 0,79
B21X	23,68	26,40	26,62	25,68	26,80	25,84 ± 1,59
B21Z	30,39	28,89	28,71	27,15	26,81	28,39 ± 1,80
B22Y – M1	25,72	27,72	24,58	28,82	30,98	27,56 ± 3,14
B22Y – M2	25,87	25,87	25,76	27,29	27,47	26,45 ± 1,06
B22Y – M3	24,49	25,58	25,75	27,14	24,69	25,53 ± 1,31
B23X	22,01	23,35	28,09	23,82	27,31	24,92 ± 3,28
B23Z	29,86	26,95	28,92	32,07	31,14	29,79 ± 2,47
B31Y	20,46	20,15	21,32	21,46	20,27	20,73 ± 0,76
B32X	19,12	19,32	20,42	20,17	21,35	20,08 ± 1,12
B32Z	23,21	23,59	24,40	22,83	20,20	22,85 ± 1,97
B33Y	20,49	20,94	21,38	20,52	20,40	20,75 ± 0,51

Fonte: Autor.

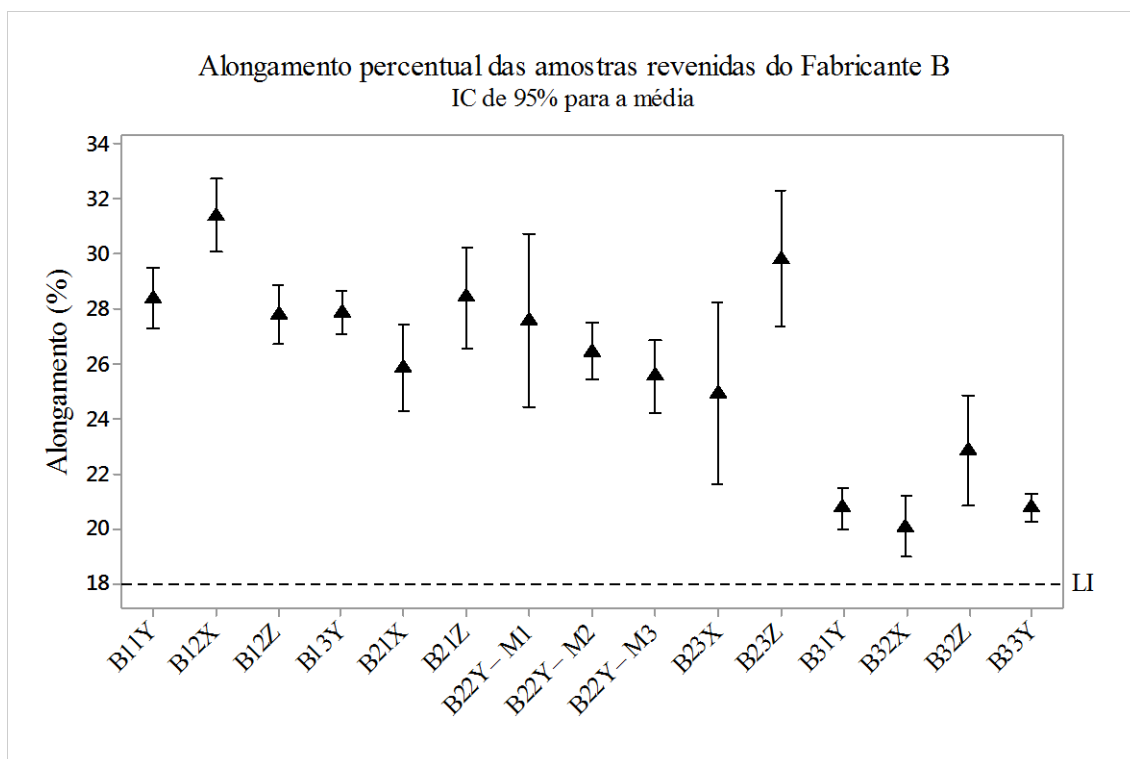


FIG. 4.7 Alongamento percentual das amostras revenidas do Fabricante B. IC: Intervalo de confiança. Limite inferior (LI) da norma API 5L X65 (2012).

Por fim, contemplando todas as análises revenidas delineadas, pode-se constatar que os conjuntos amostrais B31Y, B32X e B33Y exibem resultados de limite de escoamento, limite de resistência à tração e alongamento percentual compatíveis com a norma API 5L (2012).

4.2 ENSAIOS DE DUREZA

Corroborando com as avaliações de resistência mecânica, em conjunto com os ensaios de tração, 250 medidas de dureza Rockwell foram realizadas em amostras dos tubos dos Fabricantes A e B nas condições recebida, temperada e revenida. A partir disto, foram determinadas a média e o intervalo de confiança com 5% de significância através da distribuição *t-Student* para viabilizar uma abordagem estatisticamente descritiva dos dados.

As medidas de dureza nas amostras recebidas e temperadas contemplam as escalas de dureza Rockwell B (HRB) e C (HRC), pois o tubo do Fabricante A, como verificado anteriormente, possui maior resistência mecânica que o Fabricante B e extrapola a escala Rockwell B. No propósito de discorrer os devidos comentários das condições citadas, realizou-se a conversão das escalas de dureza atendendo ao previsto pela norma ASTM A370 (2014). Dessa forma, os valores levantados na escala Rockwell foram realocados, equivalentemente, para a escala Vickers.

Os dados de dureza dos Fabricantes A, assim como as médias e dispersões de cada série amostral, estão listados na TAB. 4.15. As amostras recebidas e temperadas estão descritas na escala Rockwell C, enquanto as revenidas são apresentadas na escala Rockwell B.

TAB. 4.15 Resultados do ensaio de dureza das amostras do Fabricante A.

FABRICANTE A							
AMOSTRAS	I	II	III	IV	V	HRC	HV
A	20	20	20	20	22	20,40 ± 1,11	240,00 ± 5,55
A11	32	27	28	30	31	29,60 ± 2,57	299,00 ± 20,21
A12	27	25	25	25	27	25,80 ± 1,36	271,20 ± 8,84
A13	28	27	26	27	30	27,60 ± 1,88	283,60 ± 14,17
A21	31	28	30	29	27	29,00 ± 1,96	294,20 ± 15,32
A22	34	33	30	29	28	30,80 ± 3,21	309,00 ± 26,75
A23	35	32	32	34	37	34,00 ± 2,63	336,00 ± 23,71
A31	30	31	29	27	26	28,60 ± 2,57	291,40 ± 19,59
A32	30	34	30	29	27	30,00 ± 3,16	302,60 ± 25,95
A33	33	30	27	27	27	28,80 ± 3,33	293,20 ± 26,52
AMOSTRAS	I	II	III	IV	V	HRB	HV
A11Y	91	88	87	88	92	89,20 ± 2,69	181,80 ± 12,49
A12X	98	91	89	88	90	91,20 ± 4,92	191,80 ± 25,96
A12Z	86	85	84	84	83	84,40 ± 1,42	164,80 ± 8,21
A13Y	89	88	87	87	90	88,20 ± 1,62	177,00 ± 6,91
A21X	90	90	90	93	93	91,20 ± 2,04	191,00 ± 10,2
A21Z	89	90	90	90	88	89,40 ± 1,11	182,20 ± 5,07
A22Y-M1	95	95	95	96	96	95,40 ± 0,68	212,40 ± 4,08
A22Y-M2	91	93	94	96	96	94,00 ± 2,63	205,40 ± 13,76
A22Y-M3	99	97	96	97	98	97,40 ± 1,42	224,40 ± 8,49
A23X	100	99	98	96	97	98,00 ± 1,96	228,00 ± 11,78
A23Z	77	78	85	83	82	81,00 ± 4,21	153,00 ± 12,63
A31Y	93	94	94	94	92	93,40 ± 1,11	202,00 ± 5,55
A32X	93	93	93	93	93	93,00	200,00
A32Z	81	89	92	92	92	89,2 ± 5,91	183,60 ± 22,72
A33Y	92	93	95	96	96	94,40 ± 2,26	207,40 ± 11,83

HRB: Dureza Rockwell B medida. HV: Dureza Vickers convertida segundo ASTM A370 (2014).

Fonte: Autor.

As medidas de dureza do Fabricante B, bem como as médias e dispersões de cada grupo amostral, foram relacionados na escala Rockwell B e descritos na TAB. 4.16.

TAB. 4.16 Resultados do ensaio de dureza das amostras do Fabricante B.

FABRICANTE B							
AMOSTRAS	I	II	III	IV	V	HRB	HV
B	85	87	86	87	89	86,80 ± 1,84	171,60 ± 6,83
B11	86	86	86	85	78	84,20 ± 4,34	163,20 ± 13,5
B12	86	87	87	85	87	86,40 ± 1,11	170,00 ± 3,83
B13	88	87	86	87	85	86,60 ± 1,42	170,80 ± 5,07
B21	91	90	88	91	92	90,40 ± 1,88	187,20 ± 8,93
B22	90	89	88	89	93	89,80 ± 2,39	184,20 ± 11,66
B23	85	87	86	87	90	87,00 ± 2,32	172,60 ± 9,32
B31	92	92	93	92	90	91,80 ± 1,36	194,00 ± 6,8
B32	92	92	92	92	91	91,80 ± 0,56	194,00 ± 2,78
B33	92	91	92	92	93	92,00 ± 0,88	195,00 ± 4,39
B11Y	76	78	72	74	78	75,60 ± 3,24	138,40 ± 7,48
B12X	78	78	77	78	79	78,00 ± 0,88	144,00 ± 2,63
B12Z	83	83	82	83	82	82,60 ± 0,68	157,80 ± 2,04
B13Y	81	80	81	81	78	80,20 ± 1,62	150,60 ± 4,86
B21X	87	85	83	85	84	84,80 ± 1,84	164,60 ± 5,99
B21Z	84	80	79	79	80	80,40 ± 2,57	151,20 ± 7,72
B22Y-M1	84	83	82	84	88	84,20 ± 2,83	163,00 ± 9,54
B22Y-M2	87	85	82	83	85	84,40 ± 2,42	163,40 ± 7,68
B22Y-M3	85	82	82	84	84	83,40 ± 1,67	160,20 ± 5,00
B23X	88	87	86	87	89	87,40 ± 1,42	173,80 ± 5,30
B23Z	80	77	77	78	79	78,20 ± 1,62	144,60 ± 4,86
B31Y	89	90	90	90	91	90,00 ± 0,88	185,00 ± 4,39
B32X	90	91	91	91	90	90,60 ± 0,68	188,00 ± 3,40
B32Z	81	83	83	85	85	83,40 ± 2,08	160,20 ± 6,23
B33Y	90	89	90	90	89	89,60 ± 0,68	183,00 ± 3,40

HRB: Dureza Rockwell B medida. HV: Dureza Vickers convertida segundo ASTM A370 (2014).

Fonte: Autor.

4.2.1 AMOSTRAS RECEBIDAS

Considerando a escala Vickers para discussões acerca das medições de dureza, verifica-se que a maioria dos resultados das amostras recebidas do Fabricante A apresenta a mesma medida de 238 HV, conforme pode ser observado na FIG. 4.8. A análise estatística aponta média de 240 HV com dispersão de 5,55 HV.

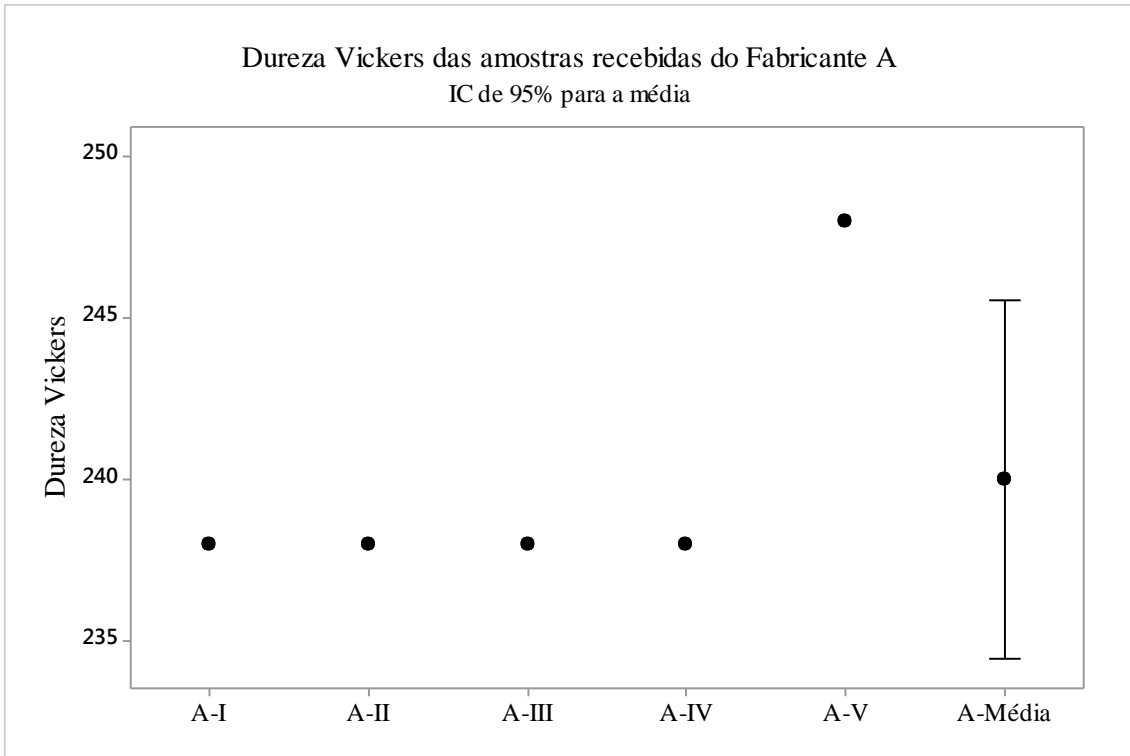


FIG. 4.8 Resultados de dureza para as amostras recebidas do Fabricante A.

Já as amostras recebidas do Fabricante B denotam uma dispersão de 6,83 HV em torno de uma média de 171,6 HV, onde os valores oscilam entre 165 e 180 HV. Tais medidas podem ser visualizadas na FIG. 4.9.

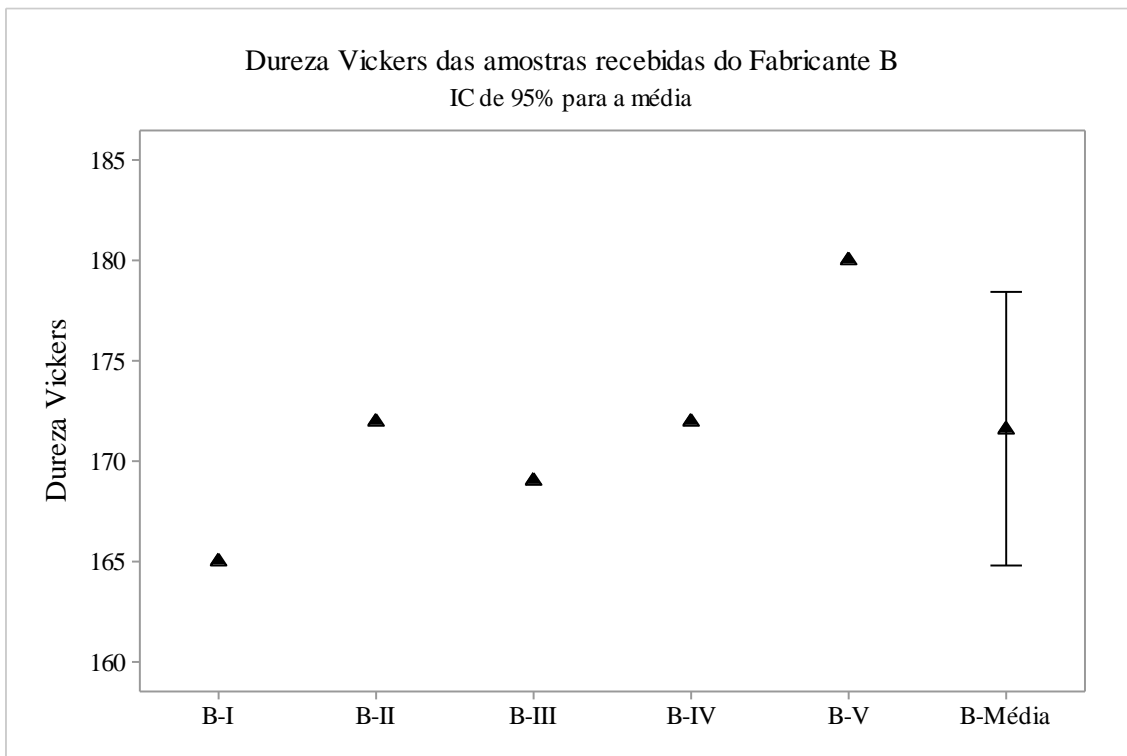


FIG. 4.9 Resultados de dureza para as amostras recebidas do Fabricante B.

4.2.2 AMOSTRAS TEMPERADAS

Os resultados de dureza dos grupos amostrais na condição temperada do Fabricante A são exibidos na FIG. 4.10. O tratamento de têmpera a 920°C com resfriamento em água na temperatura de 31°C proporcionou o maior valor de dureza entre as amostras desse grupo. Além disso, quando o intervalo de confiança é levado em consideração, as amostras com temperatura de encharque de 960°C e a amostra austenitizada em 880°C e resfriada em água a 15°C apresentam valores intermediários de dureza. Os menores valores de dureza foram verificados nas amostras austenitizadas em 880°C e resfriadas em 23 e 31°C.

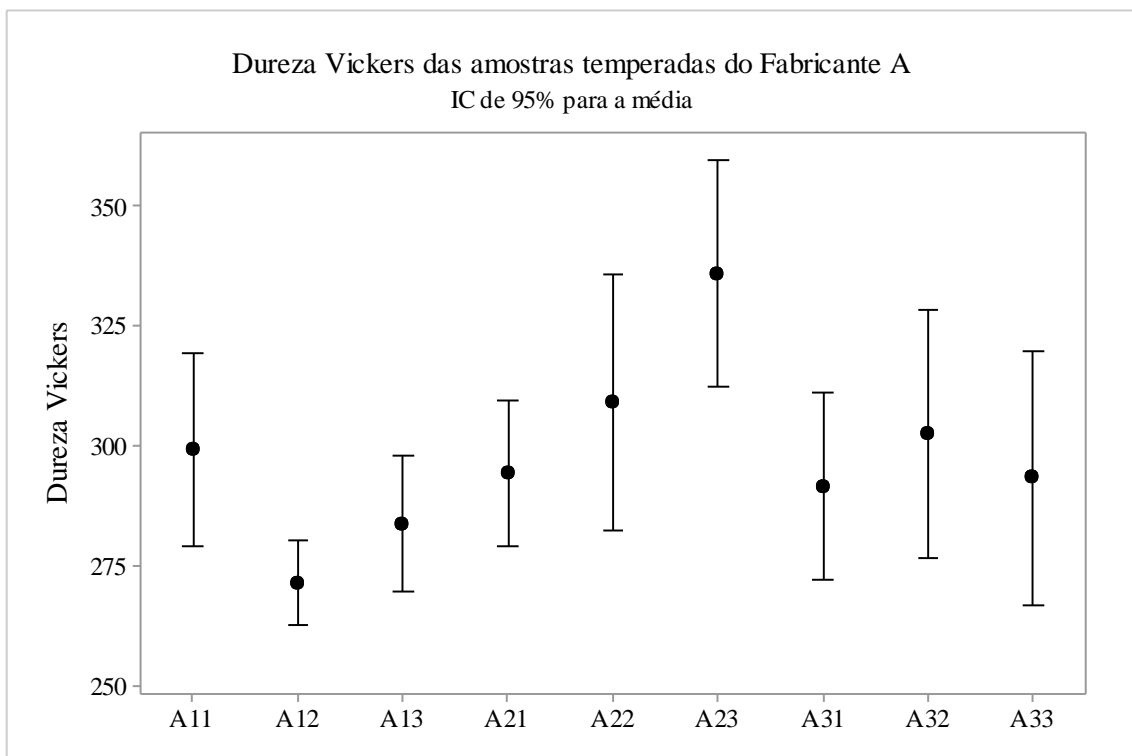


FIG. 4.10 Resultados de dureza Vickers das amostras temperadas do Fabricante A.

Os resultados de dureza Vickers das amostras do Fabricante B na condição temperada podem ser visualizados na FIG. 4.11. A análise de valores médios dos resultados induz a concluir que o encharque a 960°C resulta em maiores valores de dureza para as amostras desse conjunto. Entretanto, o cálculo dos intervalos de confiança permite observar similaridade entre esse tratamento térmico com os obtidos com encharque a 920°C e resfriamento em menores temperaturas de água. Os menores valores de dureza foram encontrados nas amostras em que a têmpera foi realizada em menor temperatura de encharque.

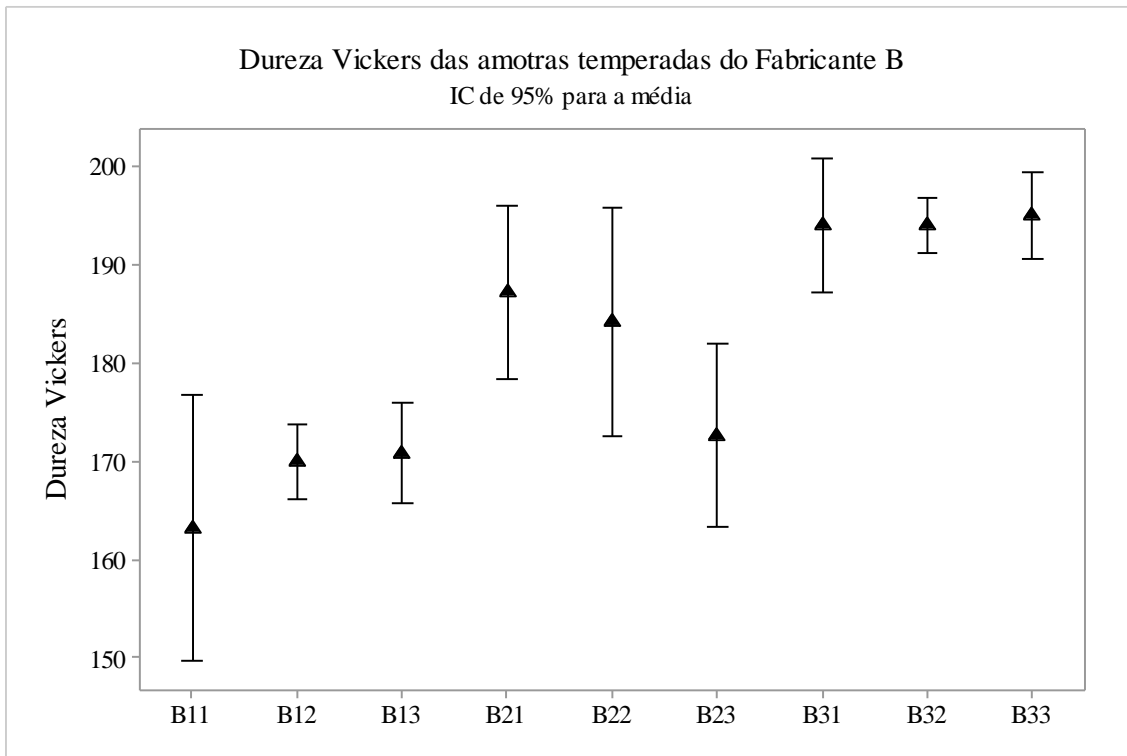


FIG. 4.11 Resultados de dureza Vickers das amostras temperadas do Fabricante B.

4.2.3 AMOSTRAS REVENIDAS

O planejamento experimental torna possível perfazer as análises de dureza das amostras revenidas do Fabricante A exibidas graficamente na FIG. 4.12. Os maiores valores de dureza encontrados, mesmo levando em consideração o intervalo de confiança, são das amostras A23X e A22Y-M3, sendo essa réplica das amostras A22Y que são referentes ao ponto central do planejamento experimental. Importante observar que o maior valor em relação a seus pares pode ser devido à dispersão natural que ocorre no ensaio de dureza. Resultados elevados também foram obtidos nas amostras com temperatura de encharque a partir de 880°C, resfriada a 23°C e revenida a 530°C (A12X) e nas amostras cuja têmpera foi realizada a 960°C, quando se observa os valores máximos dos respectivos intervalos de confiança. Entretanto, o tratamento realizado a 920°C de encharque seguido de resfriamento a 31°C e revenido a 530°C resultou no menor valor de dureza (A23Z).

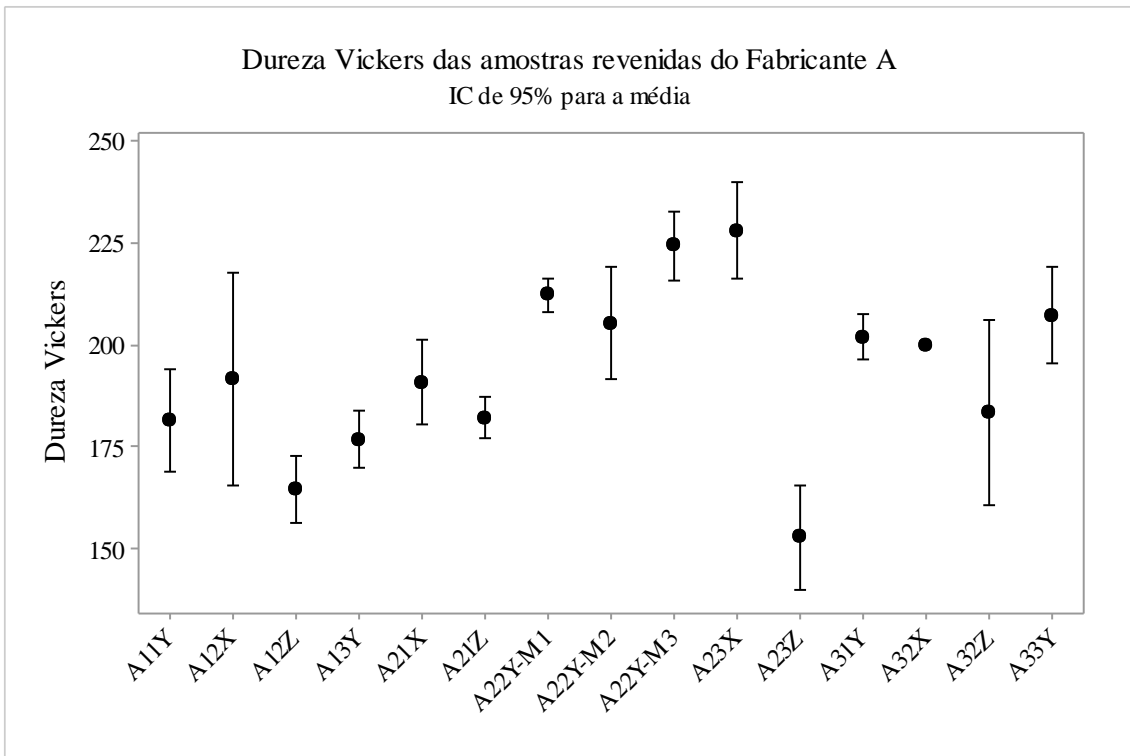


FIG. 4.12 Resultados de dureza Vickers das amostras revenidas do Fabricante A.

Os resultados de dureza das amostras revenidas através do planejamento experimental oriundas do Fabricante B estão expostos na FIG. 4.13. É fácil observar que os ensaios de dureza encontram valores maiores nas amostras em que a temperatura de encharque foi mais elevada, exceto quando a maior temperatura de revenido foi utilizada (B32Z). Durezas menores foram exibidas pelas amostras B11Y, B12X e B23Z; nas quais os tratamentos térmicos envolvidos apresentavam menores variações entre as temperaturas utilizadas. Valores intermediários de dureza Vickers foram observados nas demais amostras.

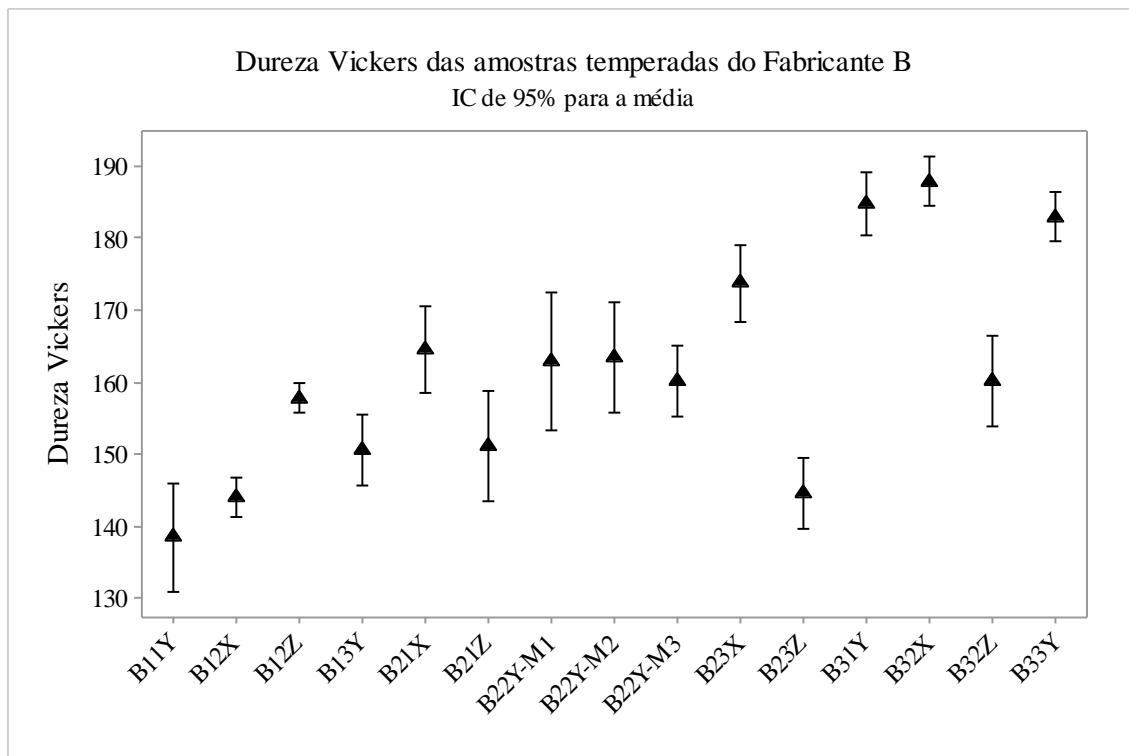


FIG. 4.13 Resultados de dureza Vickers das amostras revenidas do Fabricante B.

4.3 EFEITO MÉDIO DAS VARIÁVEIS DE TRATAMENTO TÉRMICO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

A partir da montagem da matriz de experimentos e inserção das respostas oriundas dos ensaios mecânicos é possível sintetizar os efeitos de cada uma das variáveis de entrada no desempenho dos tubos, facilitando observar como a alteração das temperaturas beneficia ou desfavorece a propriedade em análise.

Assumindo TE (temperatura de encharque), TR (temperatura da água para resfriamento) e RE (temperatura de revenido) como os fatores que modificam os valores do limite de escoamento, limite de resistência à tração e alongamento percentual, pode-se visualizar graficamente os efeitos médios dessas variáveis sobre cada uma destas propriedades. As médias aqui estimadas foram calculadas a partir de cinco corpos de prova de tração do material revenido para cada uma das quinze condições levantadas através do planejamento experimental, totalizando 75 ensaios de tração, tanto para o Fabricante A quanto para o Fabricante B.

4.3.1 FABRICANTE A

O efeito médio das temperaturas utilizadas em cada etapa dos tratamentos térmicos no limite de escoamento das amostras está demonstrado graficamente na FIG. 4.14.

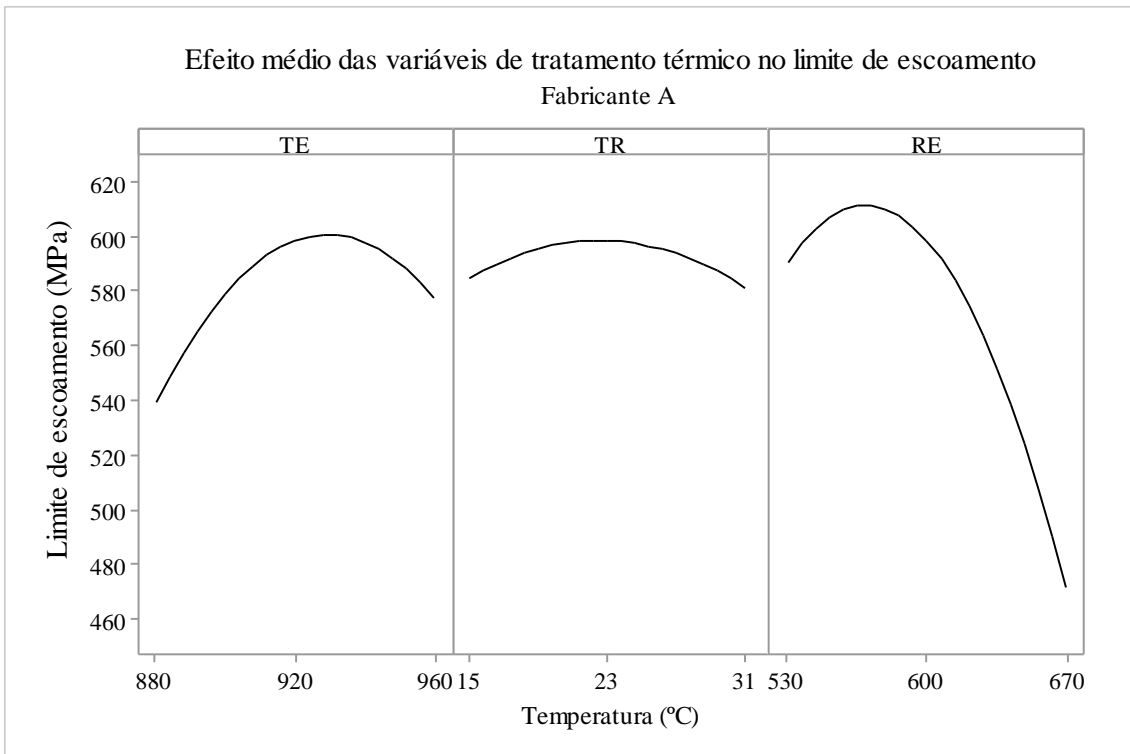


FIG. 4.14 Curva resultante do efeito médio das variáveis de tratamento térmico no limite de escoamento de amostras do Fabricante A. Temperatura de encharque (TE), Temperatura da água para resfriamento (TR), Temperatura de revenido (RE).

As temperaturas empregadas nas etapas de tratamento térmico de têmpera e revenido das amostras do Fabricante A tem forte influência no limite de escoamento encontrado, enquanto a variação da temperatura da água de resfriamento não altera a propriedade mecânica de forma relevante. Os maiores valores de limite de escoamento foram encontrados para a temperatura de encharque em torno de 930°C e 570°C para a temperatura do revenido.

Como esperado, o comportamento do limite de escoamento em relação às temperaturas utilizadas é similar ao limite da resistência à tração do Fabricante A, que pode ser visualizado na FIG. 4.15 em consideração às mesmas variáveis.

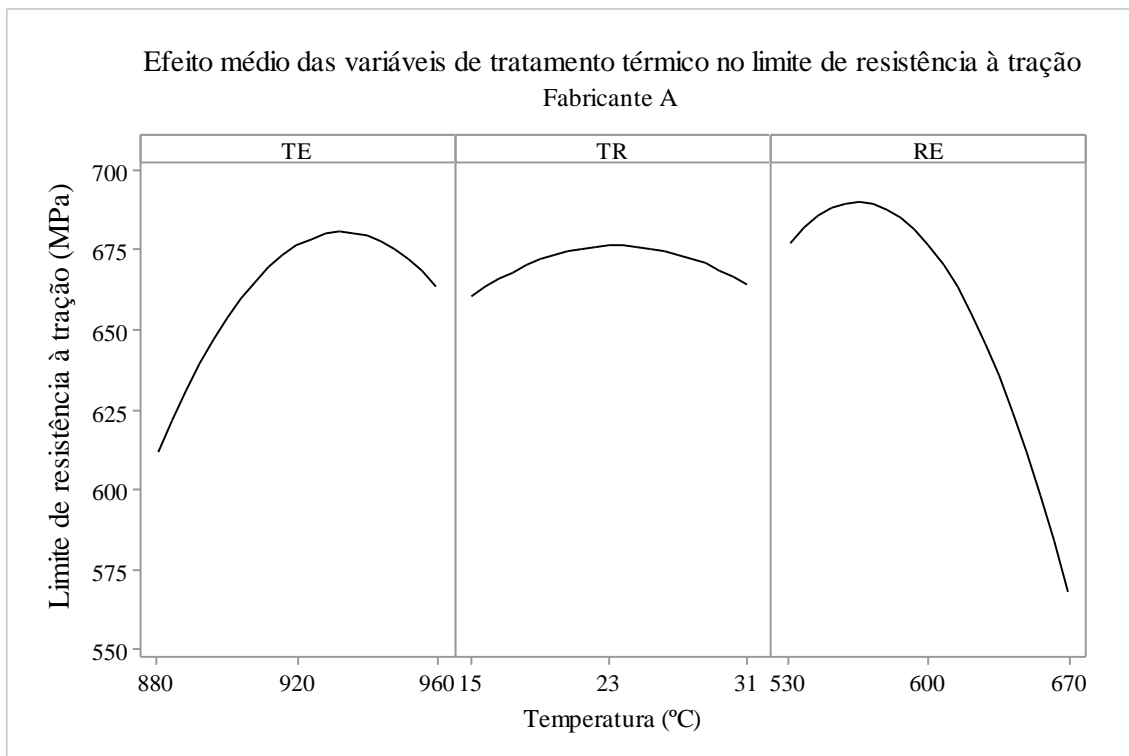


FIG. 4.15 Curva resultante do efeito médio das variáveis de tratamento térmico no limite de resistência a tração de amostras do Fabricante A. Temperatura de encharque (TE), Temperatura da água para resfriamento (TR), Temperatura de revenido (RE).

A análise das curvas de efeito médio permitem assumir que para a temperatura de encharque em 880°C o valor ajustado do limite de resistência à tração encontrado foi de 612 MPa, atingindo 680 MPa na temperatura de 920°C que é reduzido para 656 MPa em 960°C. Assim, é possível relatar que um acréscimo inicial de 40°C propicia um aumento médio de 68 MPa no limite de resistência à tração. Em contrapartida, é possível verificar que em temperaturas de encharque a partir de aproximadamente 930°C ocorre redução da resistência mecânica. No tocante a variação da temperatura de resfriamento em água, apenas uma oscilação ligeira no limite de resistência à tração pode ser observada, uma vez que o resfriamento realizado em água a 15°C resultou em um valor médio de aproximadamente 660 MPa, sendo o mesmo de 677 MPa no patamar de 23°C e declina até 665 MPa em 31°C. Reforçando que a temperatura da água não contribui de forma considerável na variação do limite de resistência à tração. Já o revenido com uma temperatura inicial de 530°C resultou em um valor médio do limite de resistência à tração de 672 MPa, aumentando para aproximadamente 690 MPa na temperatura de 600°C e reduzindo bruscamente para 568 MPa com 670°C. Deste modo, para as temperaturas iniciais de revenido o acréscimo de 70°C gerou um resultado pouco representativo em termos de resistência, uma vez que foi acrescentado ao valor médio do limite de resistência à tração um aumento de somente 18 MPa, enquanto a modificação da temperatura de 600 para

670°C acarretou na redução de 122 MPa do limite de resistência à tração. Como demonstrado pela curva, temperaturas de revenido acima de cerca de 620°C são deletérias ao limite de resistência à tração. Em resumo, os maiores gradientes de resistência para o material do Fabricante A são oriundos, respectivamente, das variações nas temperaturas de encharque e de revenido, uma vez que a oscilação na temperatura da água de resfriamento não apresentou efeito expressivo no limite de resistência à tração.

As curvas de efeito médio também foram utilizadas para prever o comportamento do alongamento percentual decorrente das diferentes temperaturas de tratamentos térmicos e estão exibidas na FIG. 4.16, em que pode ser observado comportamento oposto ao obtido para os limites de escoamento (FIG. 4.14) e de resistência à tração (FIG. 4.15), como esperado.

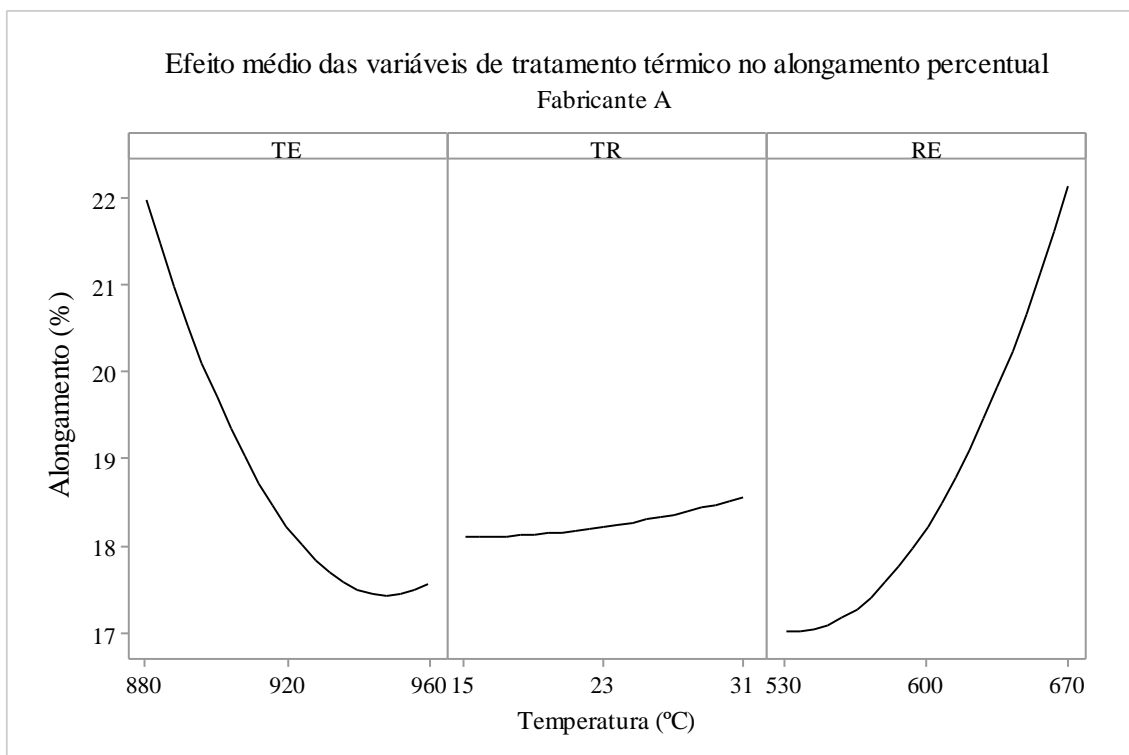


FIG. 4.16 Curva resultante do efeito médio das variáveis de tratamento térmico no alongamento percentual de amostras do Fabricante A. Temperatura de encharque (TE), Temperatura da água para resfriamento (TR), Temperatura de revenido (RE).

Na faixa de temperaturas analisada, os gráficos exibem que o aumento da temperatura provoca redução do alongamento percentual em quase toda a curva de encharque, sendo o maior valor de alongamento encontrado na menor temperatura utilizada (880°C). Embora haja acréscimo da propriedade com a temperatura de encharque a partir de cerca de 940°C, não podem ser feitas previsões sobre o comportamento das variáveis extrapolando as temperaturas das amostras ensaiadas. A partir das curvas apresentadas é perceptível que a variável que mais exprime variações no alongamento percentual é a temperatura de revenido, cuja influência

sobre a propriedade mecânica é significativa. Por outro lado e de forma análoga às outras propriedades mecânicas, a temperatura da água utilizada no resfriamento não impactou de forma relevante os valores de alongamento encontrados.

4.3.2 FABRICANTE B

Gráficos de efeito médio também foram utilizados para sintetizar o comportamento das variáveis de tratamentos térmicos no Limite de escoamento do Fabricante B e os resultados estão expostos na FIG. 4.17, lembrando que TE, TR e RE são, respectivamente, as temperaturas de encharque, da água de resfriamento e de revenido.

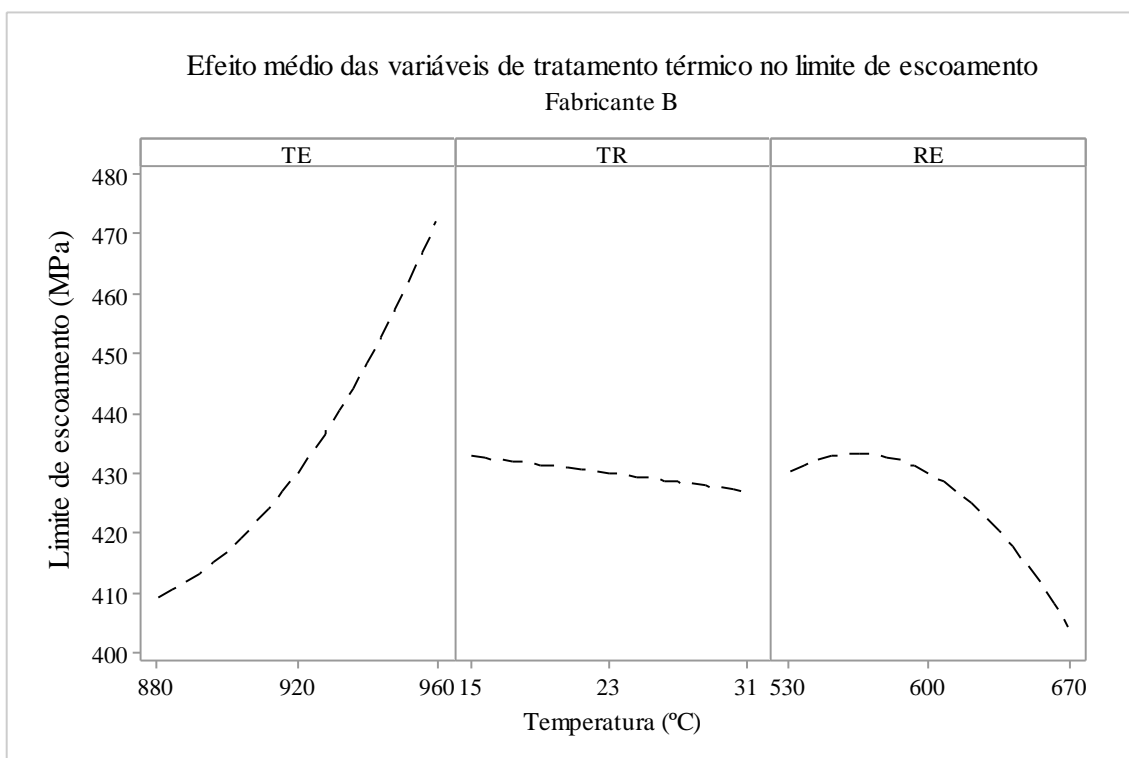


FIG. 4.17 Curva resultante do efeito médio das variáveis de tratamento térmico no limite de escoamento de amostras do Fabricante B Temperatura de encharque (TE), Temperatura da água para resfriamento (TR), Temperatura de revenido (RE).

A temperatura de encharque influi diretamente no limite de escoamento das amostras do Fabricante B, sendo o menor valor encontrado na temperatura de 880°C e o maior em 960°C em virtude da tendência de crescimento do limite de escoamento pela temperatura de encharque para as faixas de temperatura analisadas. O revenido de 530 até aproximadamente 560°C é

favorável ao limite de escoamento, mas a partir desta faixa de temperatura propicia redução desta propriedade.

O gráfico de efeitos (FIG. 4.18) no limite de resistência à tração do tubo do Fabricante B permite uma visualização geral da variação desta propriedade mecânica em torno das variáveis de tratamento térmico. É notável a semelhança entre o comportamento do limite de resistência à tração e do limite de escoamento das amostras do Fabricante B.

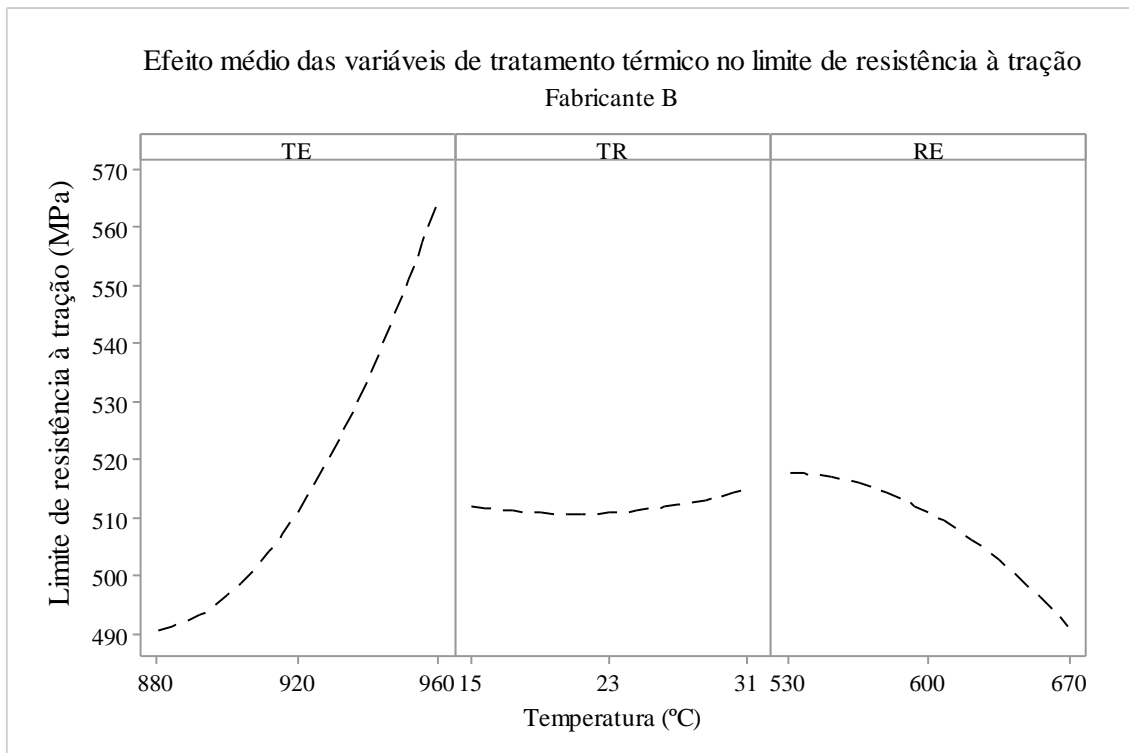


FIG. 4.18 Curva resultante do efeito médio das variáveis de tratamento térmico no limite de resistência à tração de amostras do Fabricante B Temperatura de encharque (TE), Temperatura da água para resfriamento (TR), Temperatura de revenido (RE).

A análise das curvas de efeito médio nos diz que o acréscimo na temperatura de encharque é favorável ao limite de resistência à tração no aço B. Para uma temperatura de encharque de 880°C, a média do limite de resistência à tração é aproximadamente 489 MPa, e aumenta para 521 MPa em 920°C e para 565 MPa com 960°C. O mesmo efeito da temperatura sobre as propriedades mecânicas não foi observado para a água de resfriamento, em que não houve alteração expressiva no limite de resistência à tração. Na faixa de 15°C a 23°C há uma ligeira oscilação entre 512 e 510 MPa na propriedade, que aumenta para 514 MPa quando a 31°C. Já na temperatura de revenido em 530°C o limite de resistência à tração exibe uma média de 517 MPa, reduzindo para 509 MPa em 600°C e, continuando com a decréscimo, atinge o valor de 491 MPa em 670°C.

Na FIG. 4.19 estão demonstradas as curvas de efeito médio das variáveis de tratamentos térmicos sobre o alongamento percentual das amostras do Fabricante B, sendo possível observar a relação inversa entre alongamento percentual e o limite de resistência à tração (FIG. 4.18).

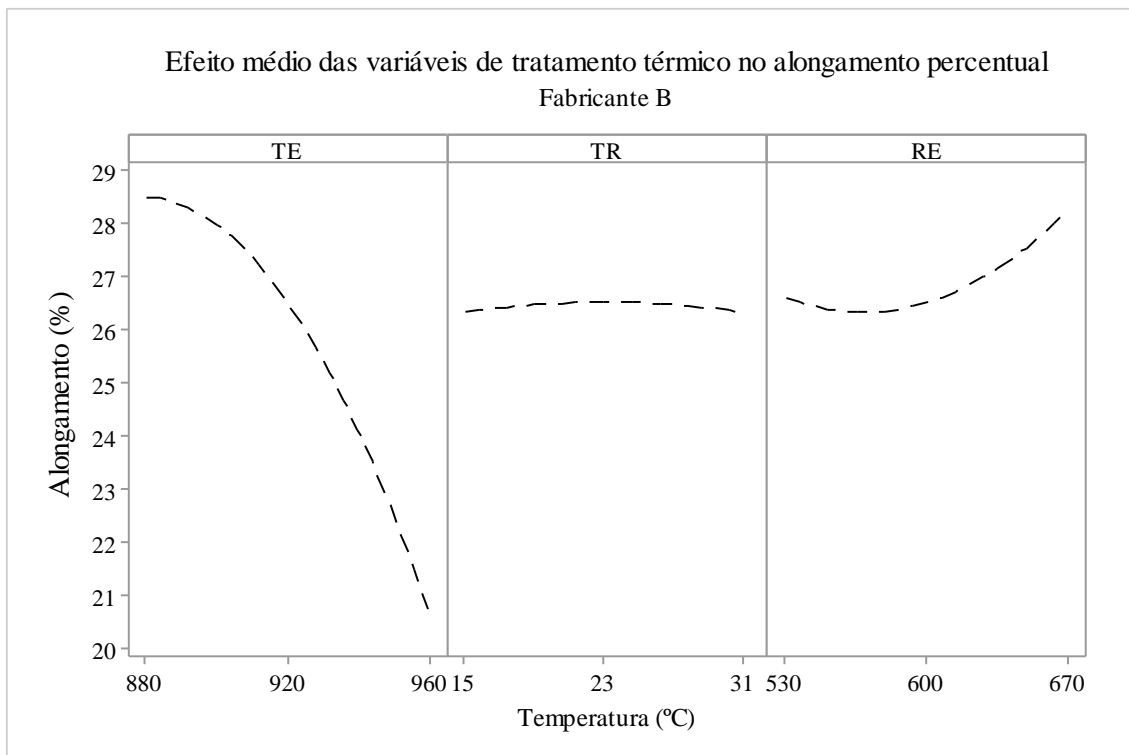


FIG. 4.19 Curva resultante do efeito médio das variáveis de tratamento térmico no alongamento percentual de amostras do Fabricante B Temperatura de encharque (TE), Temperatura da água para resfriamento (TR), Temperatura de revenido (RE).

Os maiores valores de alongamento percentual podem ser encontrados, dentro da faixa de temperaturas analisadas, para a menor temperatura de encharque e a maior temperatura de revenido, respectivamente, 880 e 670°C. A temperatura de encharque tem forte influência sobre a propriedade mecânica, uma vez que a curva respectiva tem inclinação considerável, ao mesmo tempo em que a temperatura de revenido é relevante para obter alongamento desejado. De forma idêntica às outras propriedades mecânicas obtidas das amostras do Fabricante B, a temperatura da água de resfriamento não foi importante para o resultado de alongamento percentual. Essa irrelevância também foi observada para as amostras do Fabricante A.

4.4 MODELAGEM MATEMÁTICA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

A partir do delineamento experimental proposto e através das análises de dados experimentais via regressão, e com o auxílio do *software* Statgraphics Centurion XV versão 15.01.02, foi possível gerar equações matemáticas que permitem prever valores de propriedades mecânicas a partir das variáveis utilizadas nos tratamentos térmicos, ou seja, TE (temperatura de encharque em °C), TR (temperatura de resfriamento em °C) e RE (temperatura de revenido em °C) como dados de entrada para cada um dos tubos dos dois fabricantes. Essas equações com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) estão apresentadas graficamente através do coeficiente de correlação (r) entre os valores previstos e os experimentais.

As equações de regressão propostas descrevem, considerando as faixas de temperatura abordadas, a relação entre os parâmetro de tratamento térmico nas propriedades mecânicas e os seus coeficientes de determinação (R^2) expressam o percentual de ajuste que pode ser explicado pelo modelo proposto. A partir disto, os valores gerados por regressão foram verificados com os obtidos experimentalmente e, desta forma, plotados graficamente em torno de suas correlações (r).

4.4.1 LIMITE DE ESCOAMENTO

A interação entre o limite de escoamento associado às variáveis de tratamentos térmicos das amostras do Fabricante A foi sintetizada na EQ. 4.2, utilizada para a confecção do gráfico da FIG. 4.20. Na equação é possível perceber boa correlação entre os dados calculados e os experimentais desta propriedade, atingindo coeficiente de determinação de 83,7% e validando o modelo matemático proposto.

$$\begin{aligned} LE_{Fabricante A} = & -26108,3 + 46,1373 * TE + 22,0963 * TR + 17,5577 * \\ & RE - 0,0251205 * TE^2 - 0,242099 * TR^2 - 0,0137599 * RE^2 + 0,0330516 * \\ & TE * TR - 0,000329464 * TE * RE - 0,0692875 * TR * RE \end{aligned} \quad EQ. 4.2$$

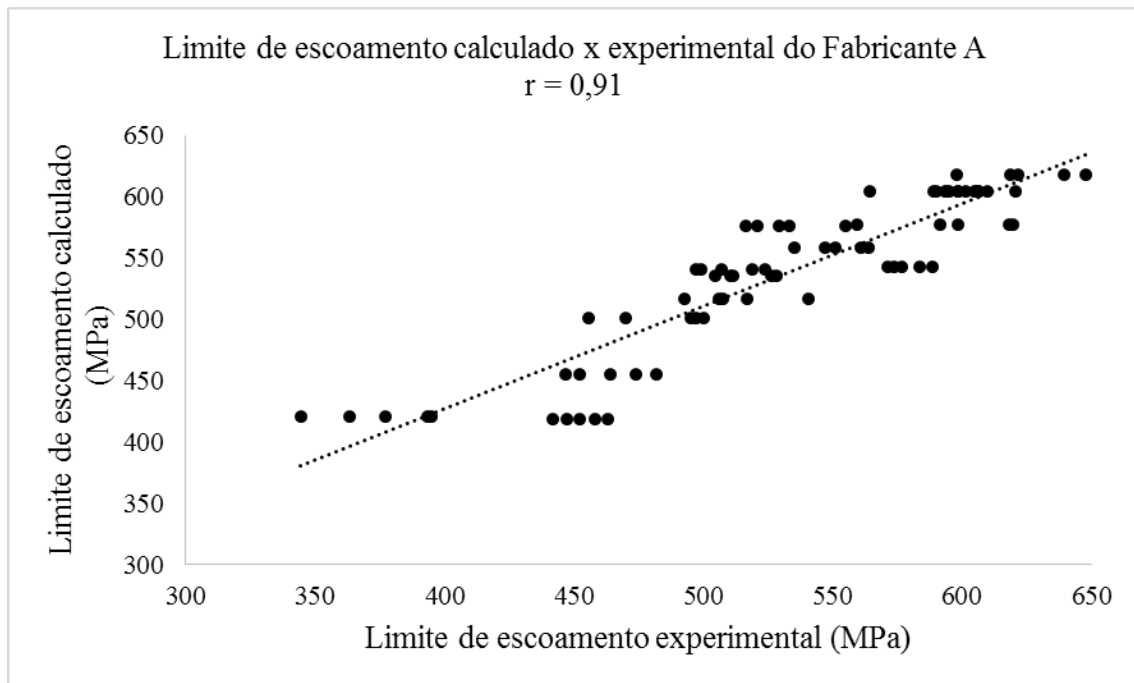


FIG. 4.20 Correlação entre valores experimentais e calculados de limite de escoamento das amostras do tubo do Fabricante A.

As mesmas variáveis podem ser utilizadas para prever o comportamento experimental do limite de escoamento das amostras do Fabricante B, uma vez que a equação proposta (EQ. 4.3) foi projetada graficamente (FIG. 4.21) e o R^2 obtido foi de 80,9%, caracterizando bom ajuste com os dados experimentais.

$$\begin{aligned}
 LE_{Fabricante\ B} = & 950,119 - 7,89352 * TE + 8,93089 * TR + 9,02211 * RE + \\
 & 0,00672578 * TE^2 - 0,00201953 * TR^2 - 0,00258832 * RE^2 + 0,00111875 * \\
 & TE * TR - 0,00620446 * TE * RE - 0,0170607 * TR * RE
 \end{aligned}
 \quad \text{EQ. 4.3}$$

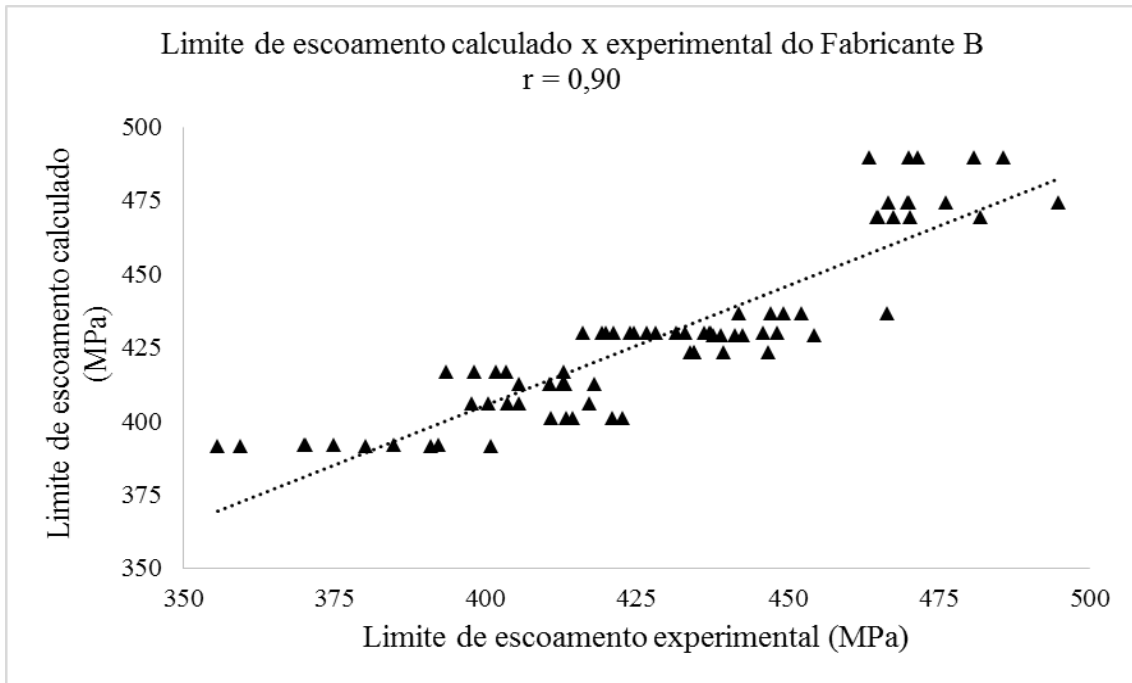


FIG. 4.21 Correlação entre valores experimentais e calculados de limite de escoamento das amostras do tubo do Fabricante B.

Considerando o coeficiente de correlação 0,90 e 0,91 entres os dados previstos pela regressão e os experimentais pode-se afirmar que os modelos propostos para estimar o limite de escoamento a partir das temperaturas utilizadas na têmpera e revenido das amostras de ambos os fabricantes podem ser utilizados para simulação desta propriedade mecânica a partir dos tratamentos térmicos realizados.

4.4.2 LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

O modelo de regressão para o limite de resistência à tração das amostras revenidas do Fabricante A resultou em R^2 de 88,1%. Dessa forma, é possível utilizar a EQ. 4.4 para prever os valores desta propriedade a partir das temperaturas utilizadas no tratamento térmico, como demonstra o gráfico de FIG. 4.22.

$$\begin{aligned}
 LR_{Fabricante\ A} = & -23192 + 43,69 * TE + 8,5 * TR + 12,03 * RE - 0,02418 * \\
 & TE^2 - 0,2196 * TR^2 - 0,01095 * RE^2 + 0,0279 * TE * TR + 0,00136 * TE * \\
 & RE - 0,03973 * TR * RE
 \end{aligned}
 \tag{EQ. 4.4}$$

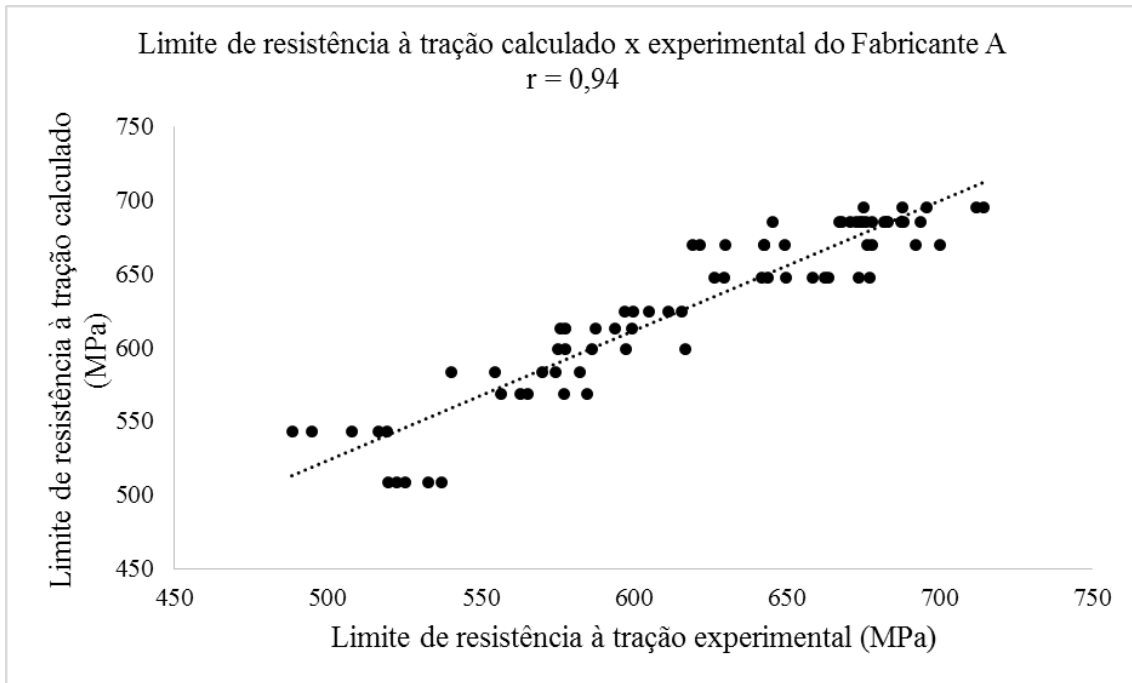


FIG. 4.22 Correlação entre valores experimentais e calculados de limite de resistência à tração das amostras do tubo do Fabricante A.

A equação prevista os valores de limite de resistência à tração para as amostras do Fabricante B (EQ. 4.5) não apresentou coeficiente de determinação tão acentuado como das amostras do Fabricante A, mas, como pode ser observado no gráfico da FIG. 4.23, é possível prever os resultados com 83,4% de acurácia, de acordo com a regressão realizada.

$$\begin{aligned}
 LR_{Fabricante\ B} = & 3211 - 12,89 * TE - 1,5 * TR + 9,59 * RE + 0,01040 * \\
 TE^2 + & 0,0405 * TR^2 - 0,0013 * RE^2 + 0,0008 * TE * TR - 0,00889 * TE * \\
 & RE - 0,00148 * TR * RE
 \end{aligned}
 \tag{EQ. 4.5}$$

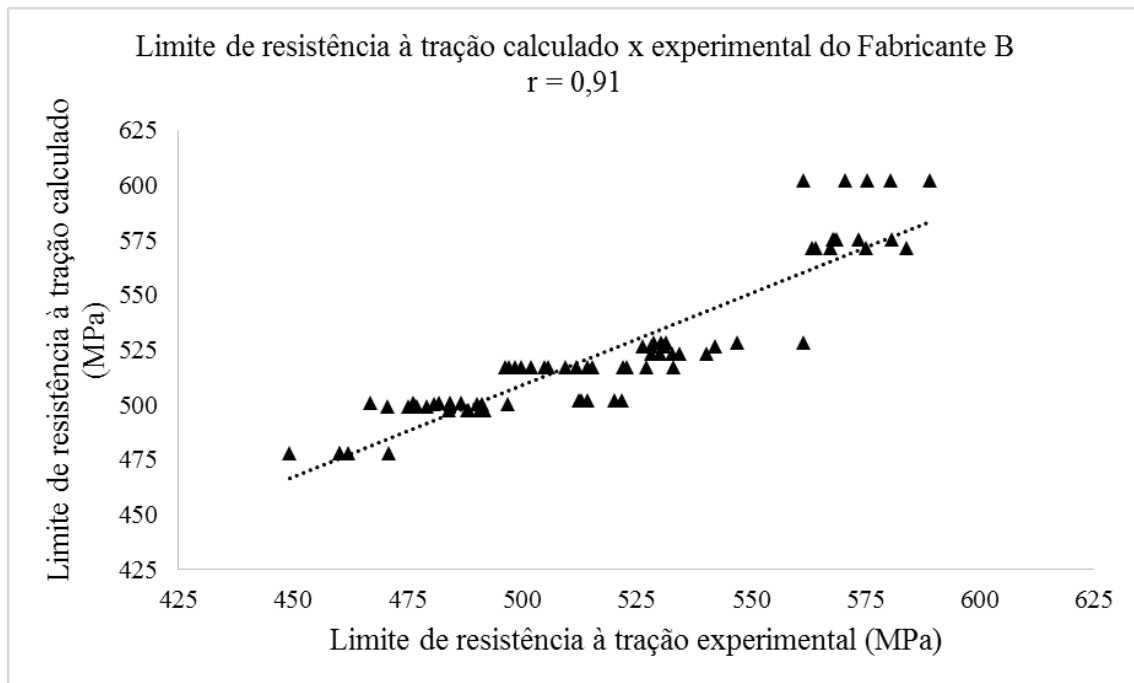


FIG. 4.23 Correlação entre valores experimentais e calculados de limite de resistência à tração das amostras do tubo do Fabricante B.

A análise dos coeficientes de correlação 0,94 e 0,91 entre os dados experimentais e calculados para o limite de resistência à tração de ambos os fabricantes, se mostra conveniente e torna possível considerar os modelos de regressão para estimar os valores dessa propriedade mecânica em função das variáveis de tratamento térmico.

4.4.3 ALONGAMENTO PERCENTUAL

É possível prever o alongamento percentual para as amostras do Fabricante A através da EQ. 4.6. O coeficiente de determinação de 81,3% envolvido nessa modelagem está descrito na FIG. 4.24.

$$\begin{aligned}
 AL_{Fabricante A} = & 1058 - 1,928 * TE - 0,142 * TR - 0,457 * RE + 0,000972 * \\
 & TE^2 + 0,00172 * TR^2 + 0,000275 * RE^2 - 0,000445 * TE * TR + 0,000156 * \\
 & TE * RE + 0,000835 * TR * RE
 \end{aligned}
 \quad EQ. 4.6$$

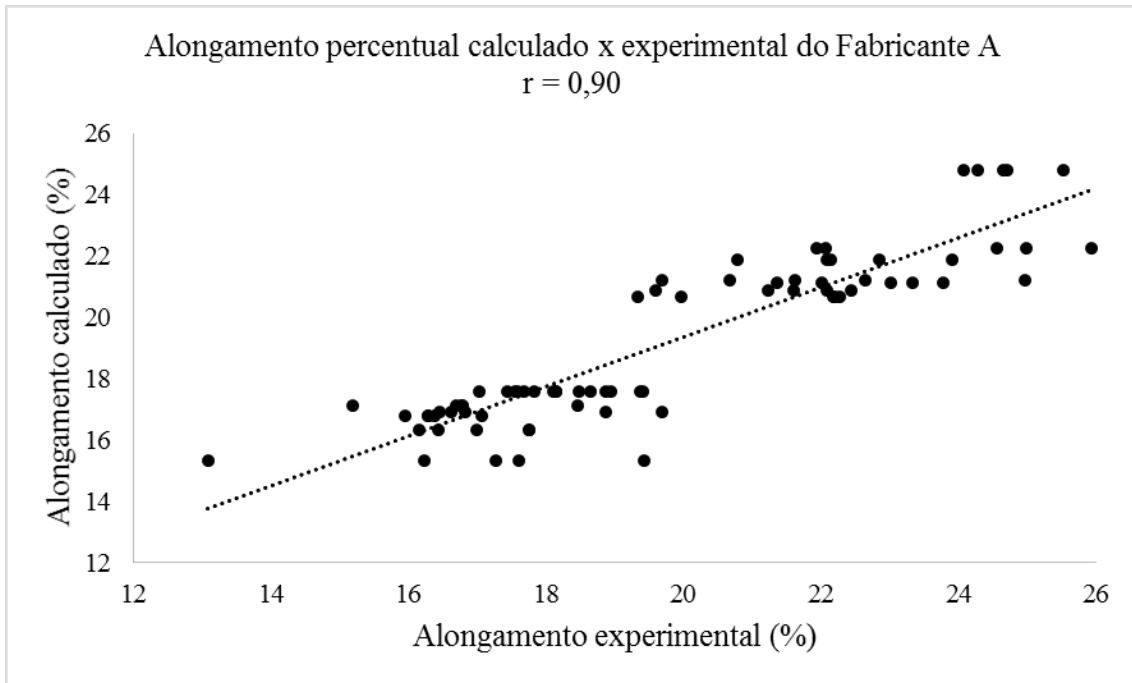


FIG. 4.24 Correlação entre valores experimentais e calculados de alongamento percentual das amostras do tubo do Fabricante A.

As variações de alongamento percentual resultantes de tratamentos térmicos em tubos produzidos pelo Fabricante B podem ser estimadas pela EQ. 4.7, que apresentou R^2 considerável de 81,6%, como demonstrado através do gráfico presente na FIG. 4.25.

$$\begin{aligned}
 AL_{Fabricante\ B} = & -492 + 1,731 * TE - 0,86 * TR - 0,756 * RE - 0,001184 * \\
 & TE^2 - 0,00292 * TR^2 + 0,000185 * RE^2 + 0,0004 * TE * TR + 0,000568 * \\
 & TE * RE + 0,001032 * TR * RE
 \end{aligned}
 \tag{EQ. 4.7}$$

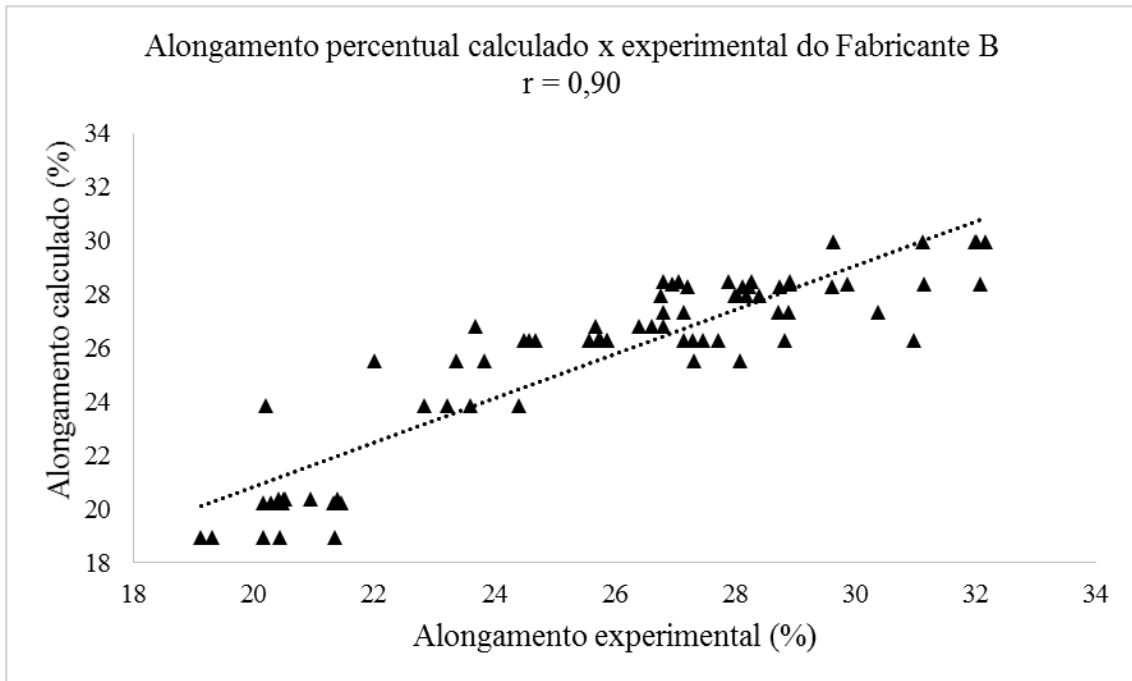


FIG. 4.25 Correlação entre valores experimentais e calculados de alongamento percentual das amostras do tubo do Fabricante B.

Os modelos matemáticos propostos para estipular tanto o alongamento percentual das amostras do Fabricante A quanto do Fabricante B apresentaram correlação forte (0,90) entre os valores experimentais e calculados. Logo, podem ser utilizados para esta finalidade.

4.4.4 DUREZA ROCKWELL B

A previsão dos resultados de Dureza Rockwell B a partir das variáveis de tratamentos térmicos é interessante do ponto de vista prático. O modelo de regressão desta propriedade para as amostras do Fabricante A está descrita na EQ. 4.8 para um coeficiente de determinação (R^2) de 78,9%. No gráfico da FIG. 4.26 pode ser visualizado a viabilidade de utilização deste modelo matemático.

$$\begin{aligned}
 HRB_{Fabricante A} = & -1383,56 + 2,58772 * TE + 3,99252 * TR + 0,781633 * \\
 & RE - 0,00148438 * TE^2 - 0,0300781 * TR^2 - 0,000770408 * RE^2 + \\
 & 0,0015625 * TE * TR + 0,000267857 * TE * RE - 0,00678571 * TR * RE
 \end{aligned}
 \tag{EQ. 4.8}$$

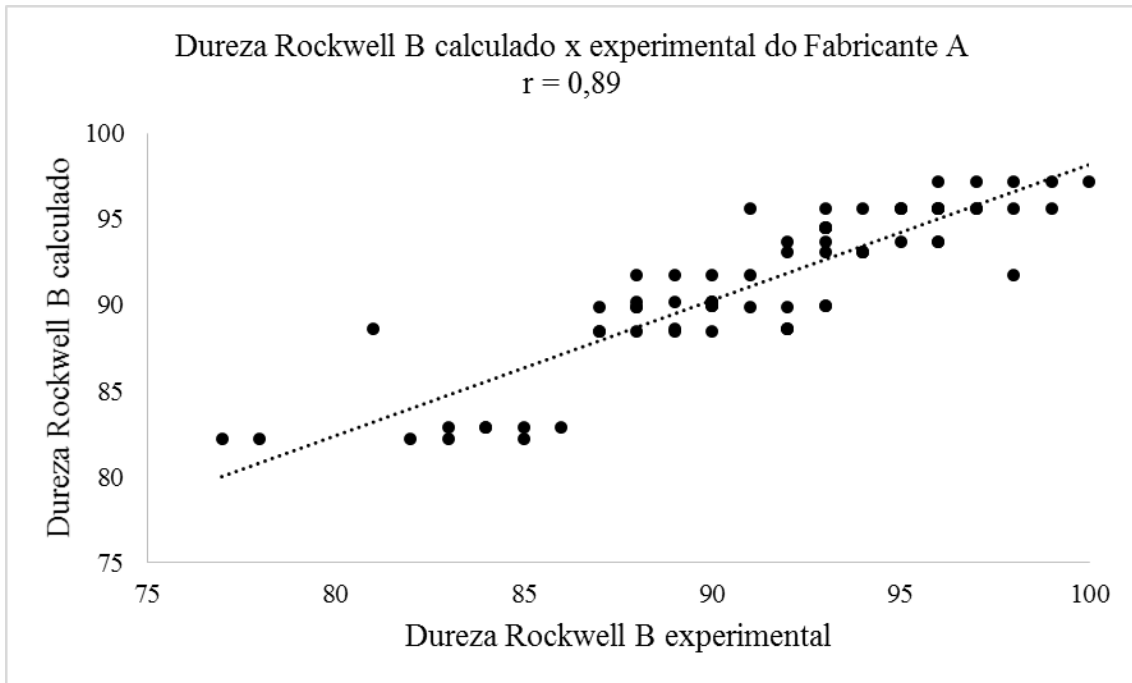


FIG. 4.26 Correlação entre valores experimentais e calculados de dureza Rockwell B das amostras do tubo do Fabricante A.

O modelo de regressão para Dureza Rockwell B associadas as temperaturas dos tratamentos térmicos também foi traçado para o tubo proveniente do Fabricante B exibido matematicamente na EQ. 4.9 e graficamente na FIG. 4.27. O coeficiente de determinação encontrado foi de 81,8%, validando a equação para estipular a propriedade mecânica a partir das variáveis envolvidas.

$$\begin{aligned}
 HRB_{Fabricante\ B} = & -549,093 + 0,378237 * TE + 5,34665 * TR + 1,17332 * \\
 & RE + 0,00025 * TE^2 - 0,00859375 * TR^2 - 0,000153061 * RE^2 - \\
 & 0,00390625 * TE * TR - 0,00105357 * TE * RE - 0,00214286 * TR * RE
 \end{aligned}
 \tag{EQ. 4.9}$$

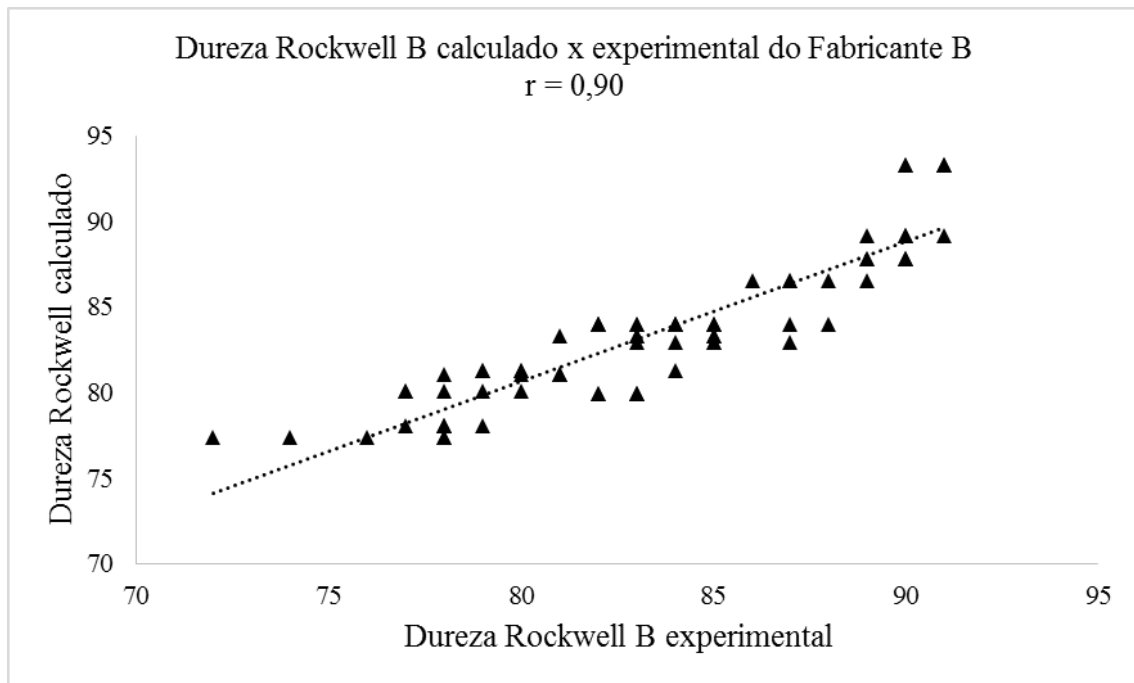


FIG. 4.27 Correlação entre valores experimentais e calculados de dureza Rockwell B das amostras do tubo do Fabricante B.

Foram encontrados coeficientes de correlação de 0,89 e 0,90 entre as equações e os dados gerados por meio dos ensaios, tornando o modelo de regressão relevante para prever o comportamento da dureza com as variações de temperaturas tanto para o Fabricante B quanto para o Fabricante A.

4.4.5 AVALIAÇÃO DAS EQUAÇÕES MATEMÁTICAS

A modelagem matemática proposta pode ser analisada a partir do coeficiente r , obtido por correlação entre os dados calculados a partir das regressões com os respectivos valores experimentais encontrados durante os ensaios mecânicos. Valores em módulo de r são melhores quanto mais próximos de 1. Os coeficientes de correlação envolvidos com as respectivas modelagens matemáticas obtidas estão resumidos na TAB. 4.17.

TAB. 4.17 Coeficientes de determinação (R^2) e de correlação (r) dos modelos matemáticos desenvolvidos.

FABRICANTE	PROPRIEDADE MECÂNICA	EQUAÇÃO	R^2 (%)	r
A	Limite de escoamento	EQ. 4.2	83,7	0,91
	Limite de resistência à tração	EQ. 4.4	88,1	0,94
	Alongamento percentual	EQ. 4.6	81,3	0,90
	Dureza Rockwell B	EQ. 4.8	78,9	0,89
B	Limite de escoamento	EQ. 4.3	80,9	0,90
	Limite de resistência à tração	EQ. 4.5	83,4	0,91
	Alongamento percentual	EQ. 4.7	81,6	0,90
	Dureza Rockwell B	EQ. 4.9	81,8	0,90

Coeficiente de determinação (R^2), aqui expresso em porcentagem, e de correlação (r). Fonte: Autor.

Levando em conta a forte correlação entres os modelos de regressão e os resultados experimentais, é possível afirmar que as equações demonstradas são eficazes para prever as propriedades mecânicas de limite de escoamento, limite de resistência a tração, alongamento percentual e dureza Rockwell B, tanto para amostras revenidas do Fabricante A quanto para o Fabricante B.

4.5 INFLUÊNCIA DA TÊMPERA E REVENIDO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Os tratamentos térmicos realizados nos tubos de ambos os fabricantes visam atingir requisitos mecânicos dentro de uma margem de segurança em conformidade com os previstos pela norma API 5L (2012), haja vista que a resistência mecânica do tubo na condição recebida do Fabricante A apresenta valores próximos dos limites inferiores, enquanto o tubo do Fabricante B para a mesma condição não atende os requisitos previstos em norma. Acrescentando ainda a necessidade de definir parâmetros de têmpera e revenido que sejam capazes de oferecer, após o processo de curvamento por indução, os requisitos necessários para atender a norma API 5L (2012) para a classe de tubos X65.

O processamento destes materiais por ciclos térmicos envolve mudança na microestrutura com a finalidade de combinar propriedades mecânicas para as aplicações para as quais são destinados. Com o propósito de acompanhar as mudanças microestruturais durante os tratamentos térmicos, amostras para análises metalográficas foram produzidas em função das variações mais expressivas em termos de resistência mecânica e alongamento encontrados em decorrência dos diferentes tratamentos.

A escolha das amostras para caracterização microestrutural foi balizada por meio da análise estatística da têmpera e do revenido nos tubos dos Fabricantes A e B, pois, apesar de cada uma das variáveis apresentarem suas devidas contribuições para o desempenho mecânico, as evoluções microestruturais tornam-se mais evidentes naquelas condições em que há aumento ou redução considerável perante alguma propriedade avaliada.

A preparação metalográfica das amostras dos Fabricantes A e B nas condições recebidas, temperadas e revenidas permitiu a coleta de imagens em aumentos de 1000X a partir de microscopia ótica para avaliação da microestrutura.

Preliminarmente estão destacadas na FIG. 4.28 as amostras dos Fabricantes A e B na condição recebida. Em ambas as microestruturas se constata a presença de carbonetos (região escura) dispersos em uma matriz ferrítica (região clara). A microestrutura do Fabricante B apresenta uma granulometria mais refinada em relação ao Fabricante A, que exibe maior concentração de carbonetos dispersos na matriz ferrítica.

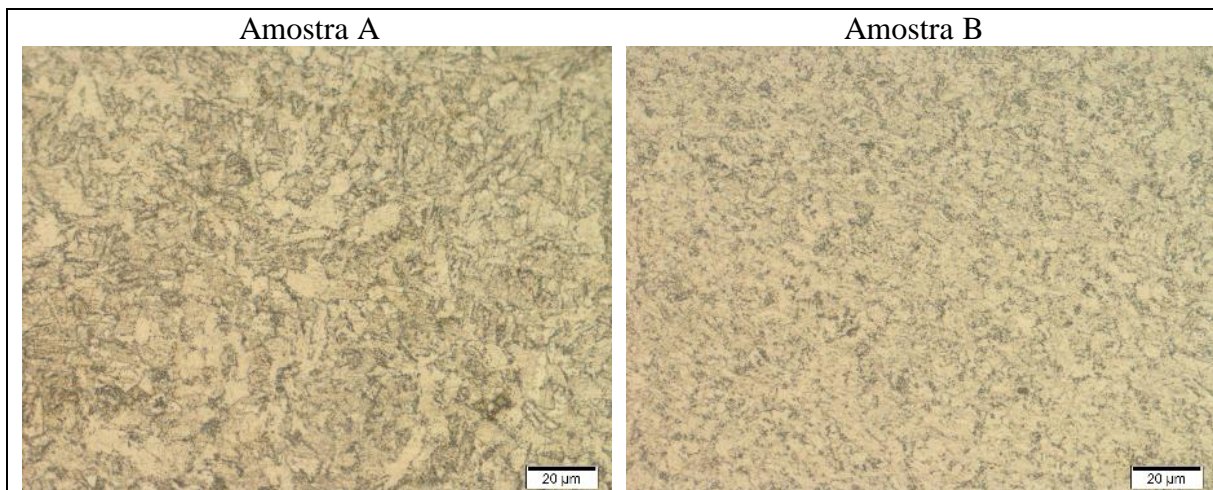


FIG. 4.28 Micrografias das amostras recebidas dos Fabricantes A e B. Aumento de 1000X.

Para a produção das amostras temperadas foi considerado o efeito médio das temperaturas de encharque e de resfriamento. Em torno da temperatura de encharque, a resistência mecânica do Fabricante A apresenta crescimento de 880 até aproximadamente 930°C, a partir desta temperatura cai ligeiramente até 960°C. Já no material do Fabricante B exibe uma curva de crescimento conforme a temperatura de encharque aumenta, caracterizando uma capacidade de obter maiores valores de resistência mecânica associada ao acréscimo da temperatura de encharque. O resfriamento em água foi capaz de oferecer taxas de resfriamento suficientes para a formação de martensita, mas as suas variações de temperatura não se mostram relevante para o incremento de resistência mecânica. Foram coletadas as imagens das amostras temperadas a partir de duas temperaturas de encharque distintas (880 e 960°C) para uma mesma temperatura

de resfriamento da água (15°C). A opção destas amostras está relacionada ao efeito médio produzido por essas temperaturas nas propriedades mecânicas conforme descrito anteriormente. As microestruturas das amostras temperadas dos Fabricantes A e B podem ser visualizadas na FIG. 4.29. Para as amostras com temperatura de encharque de 880°C são observadas uma microestrutura composta predominantemente de ferrita e carbonetos sugerindo que esta temperatura não foi suficiente para completa austenitização, onde a amostra A11 revela maior quantidade carbonetos em comparação com a amostra B11. A temperatura de encharque em 880°C pode ter ocorrido próxima da região intercrítica de ambos os aços, uma vez que estas amostras evidenciam elevada fração de ferrita ao final da têmpera, comprometendo a resistência mecânica devido à ferrita ser um microconstituente relativamente macio. Tal resultado pode ser evidenciado nas curvas resultantes do efeito médio da temperatura de encharque, onde a temperatura de 880°C apresenta a menor contribuição de resistência mecânica para os Fabricantes A e B.

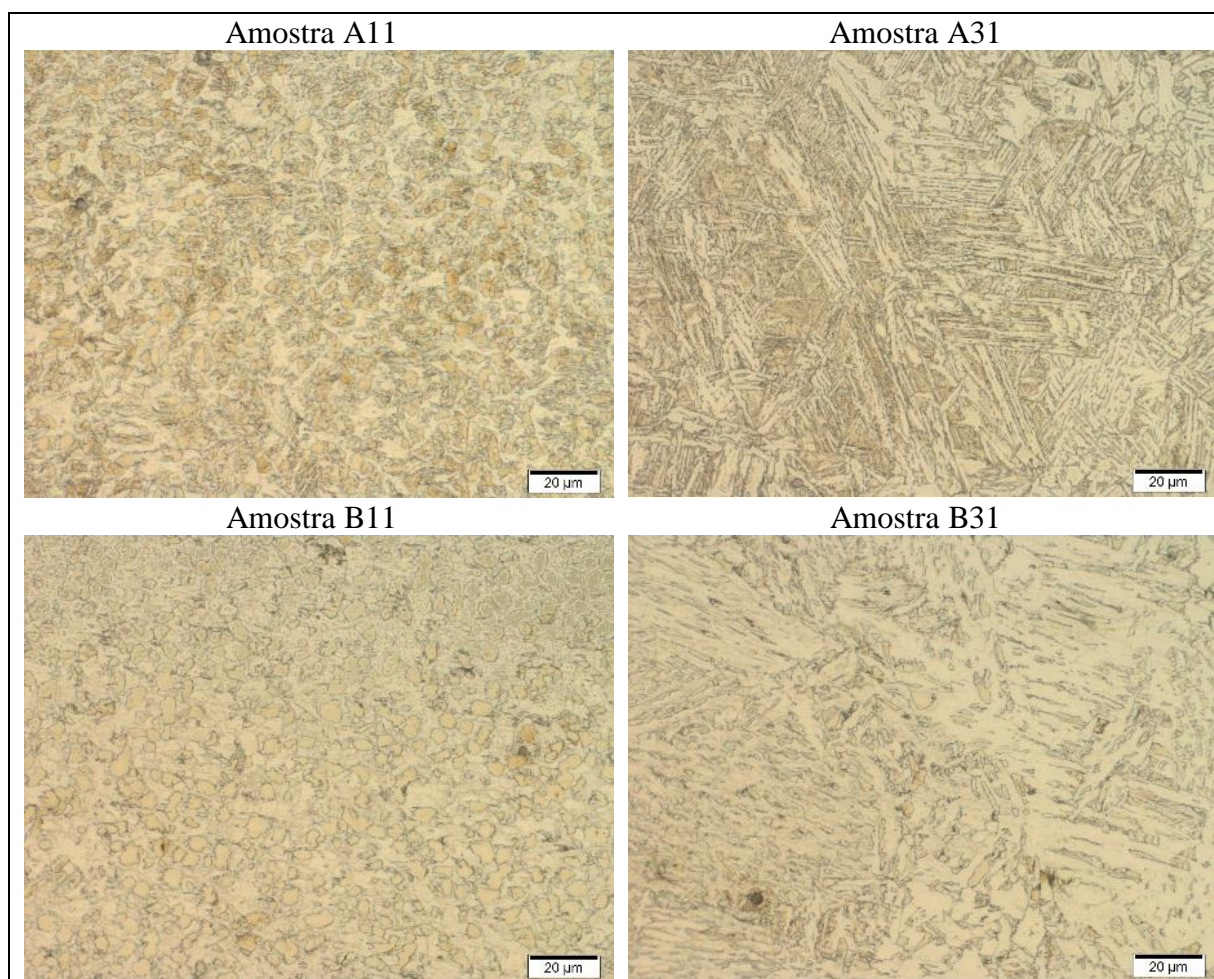


FIG. 4.29 Micrografias das amostras temperadas dos Fabricantes A e B. Aumento de 1000X.

Já as microestruturas das amostras temperadas a partir de 960°C apontam que esta temperatura de encharque possibilitou uma formação considerável de martensita na amostra temperada do Fabricante A, ao passo que na amostra temperada do Fabricante B houve formação de martensita em menor proporção. Nas amostras com temperatura de encharque de 960°C evidencia-se a presença de martensita e ferrita acicular, como também agulhas de martensita mais definidas na amostra A31 e maior resquício de ferrita acicular na amostra B31.

O teor de carbono e de elementos de liga no aço A é maior em comparação com o aço B, favorecendo a formação de carbonetos e, além disso, a granulometria observada na amostra recebida do Fabricante A é mais grosseira que a do Fabricante B, propiciando maior formação de martensita para as faixas de temperatura de encharque realizadas, em detrimento da ferrita e perlita e, conseqüentemente, elevando a dureza do material, sendo tais fatores favoráveis ao incremento de resistência mecânica.

Ademais, o maior teor de Mn no Fabricante B pode ter contribuído para expansão do campo austenítico na região intercrítica, favorecendo a manutenção da estrutura de carbonetos dispersos numa matriz ferrítica na têmpera para as menores temperaturas de encharque, conforme destacado por SOARES *et al.* (2015).

O gráfico de efeitos médios, conforme exibido previamente, resume os efeitos isolados das variáveis de tratamento térmico na resposta mecânica avaliada, não demonstrando necessariamente os efeitos sinérgicos entre as variáveis, isto é, não fornece informações sobre a interação entre os tratamentos térmicos.

Para sintetizar a influência da têmpera e revenido nas propriedades mecânicas e, por conseguinte, na evolução microestrutural de ambos os fabricantes na condição revenida, foram gerados gráficos de contorno considerando a mesma temperatura da água em 23°C no resfriamento e com variações nas temperaturas de encharque e revenido.

Os gráficos de contorno para o limite de escoamento (FIG. 4.30), limite de resistência à tração (FIG. 4.31) e alongamento percentual (FIG. 4.32) do Fabricante A foram traçados.

Gráfico de contorno estimado para o limite de escoamento

Fabricante A

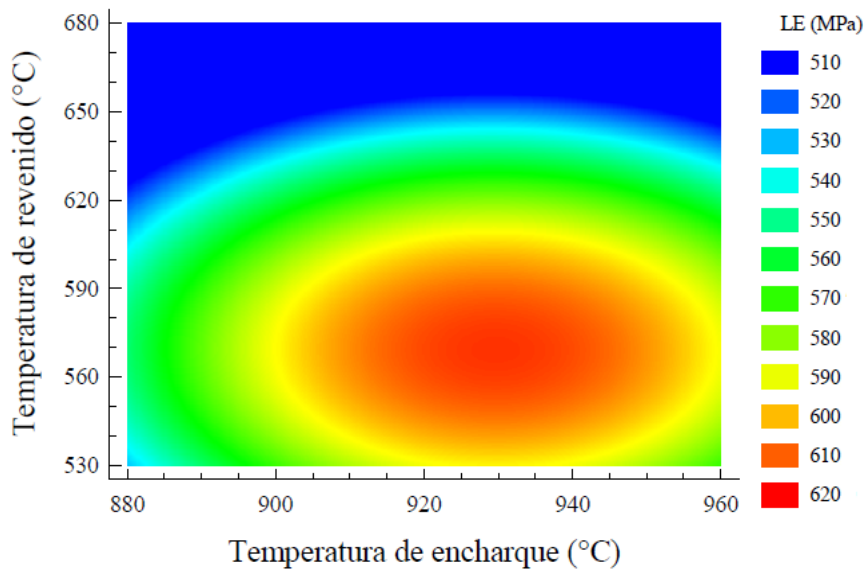


FIG. 4.30 Gráfico de contorno para o limite de escoamento do Fabricante A para temperatura de resfriamento (TR) de 23°C.

Gráfico de contorno estimado para o limite de resistência à tração

Fabricante A

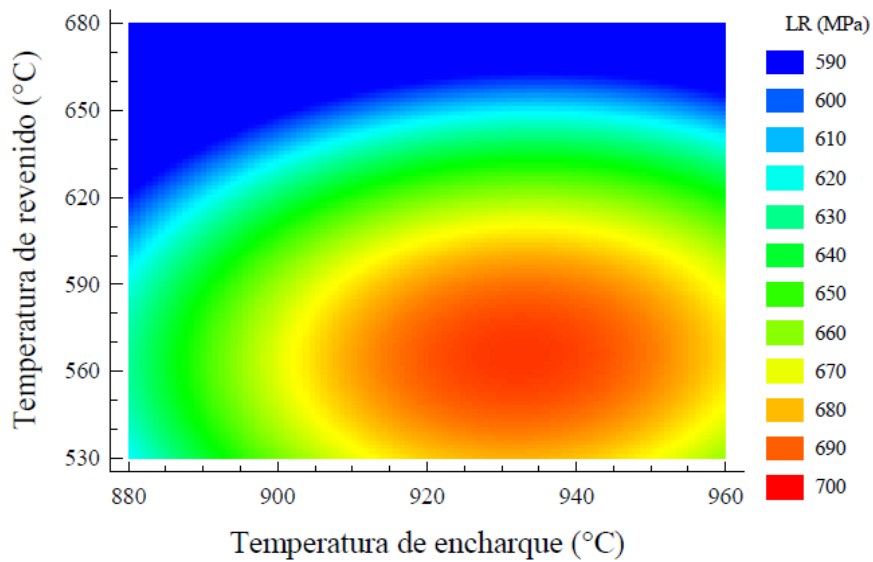


FIG. 4.31 Gráfico de contorno para o limite de resistência à tração do Fabricante A para temperatura de resfriamento (TR) de 23°C.

Gráfico de contorno estimado para o alongamento percentual

Fabricante A

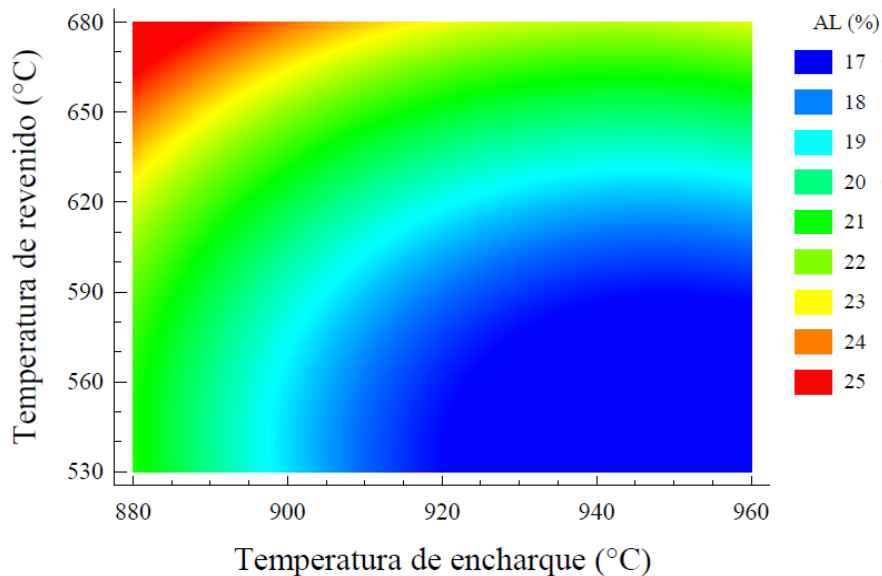


FIG. 4.32 Gráfico de contorno para o alongamento percentual do Fabricante A para temperatura de resfriamento (TR) de 23°C.

As superfícies de contorno geradas estimam a performance das propriedades mecânicas a partir das temperaturas de encharque e revenido. O uso dessa ferramenta auxiliou na escolha das amostras A12Z, A12X e A22Y para produção metalográfica, levando em consideração os gradientes de resistência e alongamento verificados graficamente, o que torna mais evidente as alterações microestruturais em decorrência dos tratamentos térmicos.

As microestruturas das amostras revenidas do Fabricante A em 530°C e 670°C com temperatura de encharque de 880°C e da amostra revenida em 670°C com temperatura de encharque de 920°C estão apresentadas na FIG. 4.33. A variação da temperatura de revenido de 530 para 670°C para amostras austenitizadas em 880°C não foi suficiente para gerar mudança significativa da microestrutura, conforme pode ser notado nas amostras A12X e A12Z e nos gráficos de contorno, onde a variação de resistência à tração encontrada é de aproximadamente 40 MPa entre a temperatura de revenido de 530 até 670°C, a maior resistência verificada nas amostras revenidas em 530°C são explicadas pela precipitação de carbonetos (região escura) presente em maior grau nas amostras A12X.

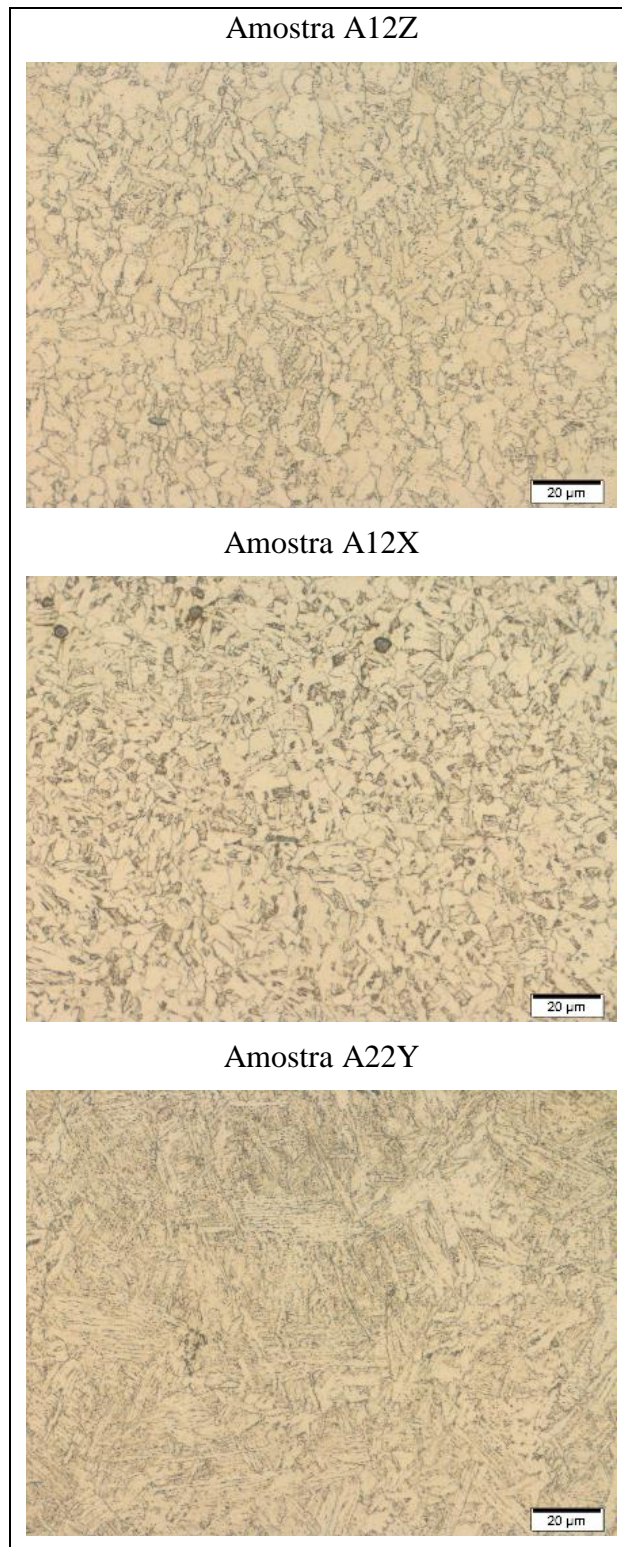


FIG. 4.33 Micrografias de amostras revenidas do Fabricante A. Aumento de 1000X.

Os maiores valores de limite de escoamento e de resistência à tração estão direcionados para as temperaturas de encharque entre 920 e 940°C e revenido de 540 a 590°C e, como esperado, tais regiões são deletérias ao alongamento percentual. Ao avaliar a microestrutura da amostra A22Y pertencente desta região, se verifica carbonetos dispersos numa matriz de ferrita

e presença de martensita revenida que não aparece nas amostras A12X e A12Z, estas constituídas predominantemente por ferrita e carbonetos. A presença de martensita revenida justifica o aumento da resistência em detrimento do alongamento em comparação com as demais amostras.

A metodologia de escolha das amostras revenidas para produção metalográfica baseado nos gráficos de contorno também foi reproduzida para o Fabricante B. Os gráficos de contorno para o limite de escoamento (FIG. 4.34), resistência à tração (FIG. 4.35) e alongamento percentual (FIG. 4.36) estão aqui exibidos.

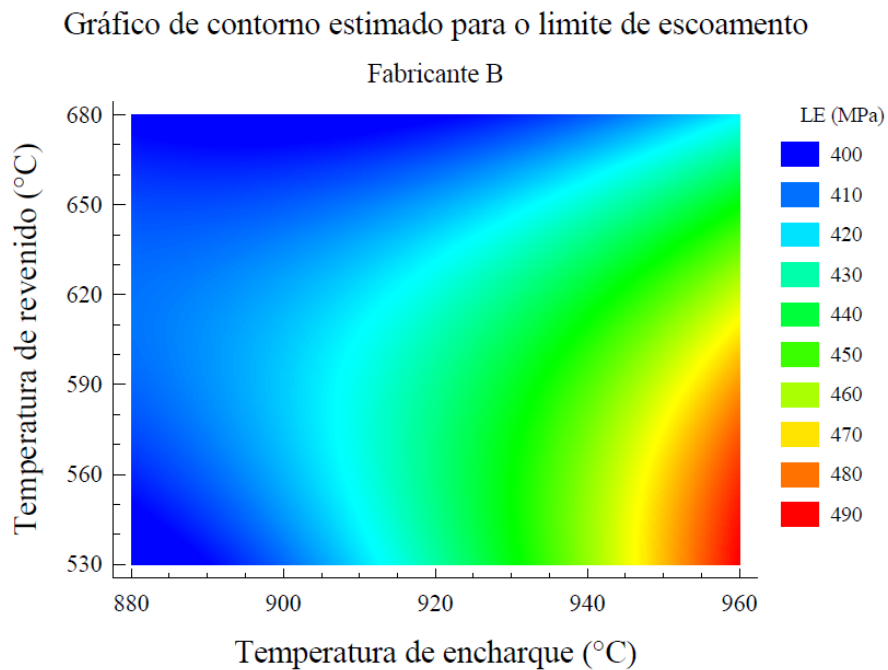


FIG. 4.34 Gráfico de contorno para o limite de escoamento do Fabricante B para temperatura de resfriamento (TR) de 23°C.

Gráfico de contorno estimado para o limite de resistência à tração

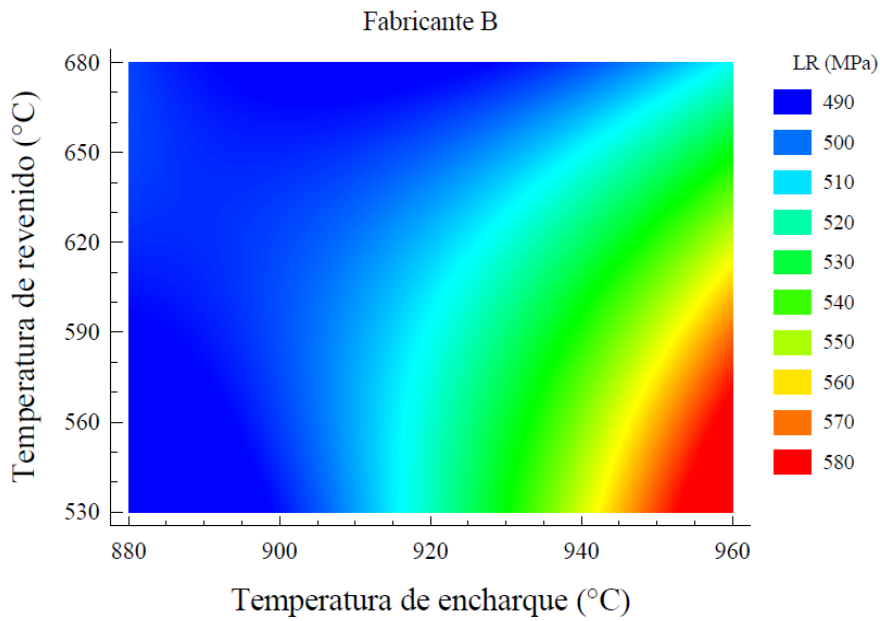


FIG. 4.35 Gráfico de contorno para o limite de resistência à tração do Fabricante B para temperatura de resfriamento (TR) de 23°C.

Gráfico de contorno estimado para o alongamento percentual

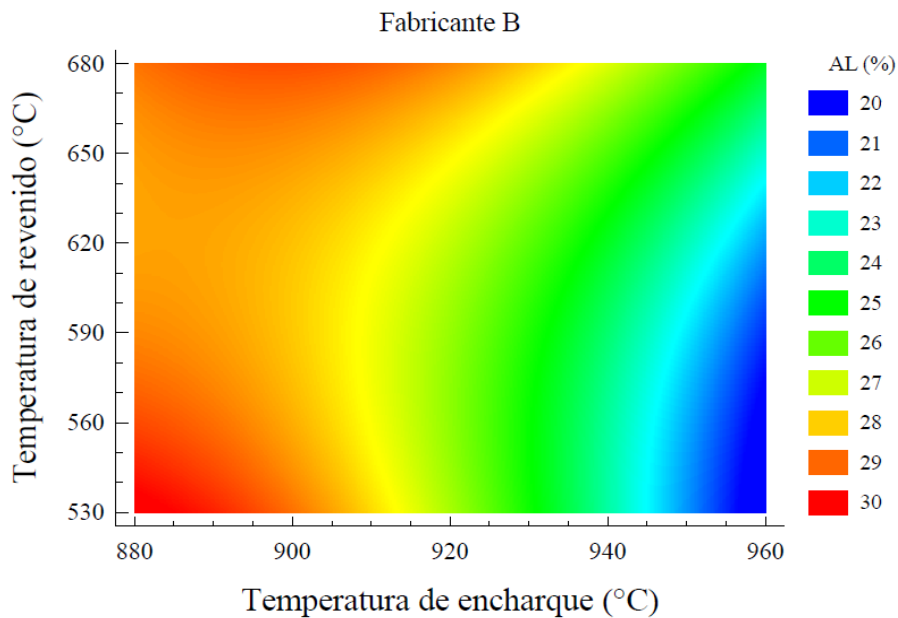


FIG. 4.36 Gráfico de contorno para o alongamento percentual do Fabricante B para temperatura de resfriamento (TR) de 23°C.

As microestruturas das amostras revenidas do Fabricante B em 530°C com temperatura de encharque de 880°C e 960°C e da amostra revenida em 600°C com temperatura de encharque de 920°C podem ser visualizadas na FIG. 4.37.

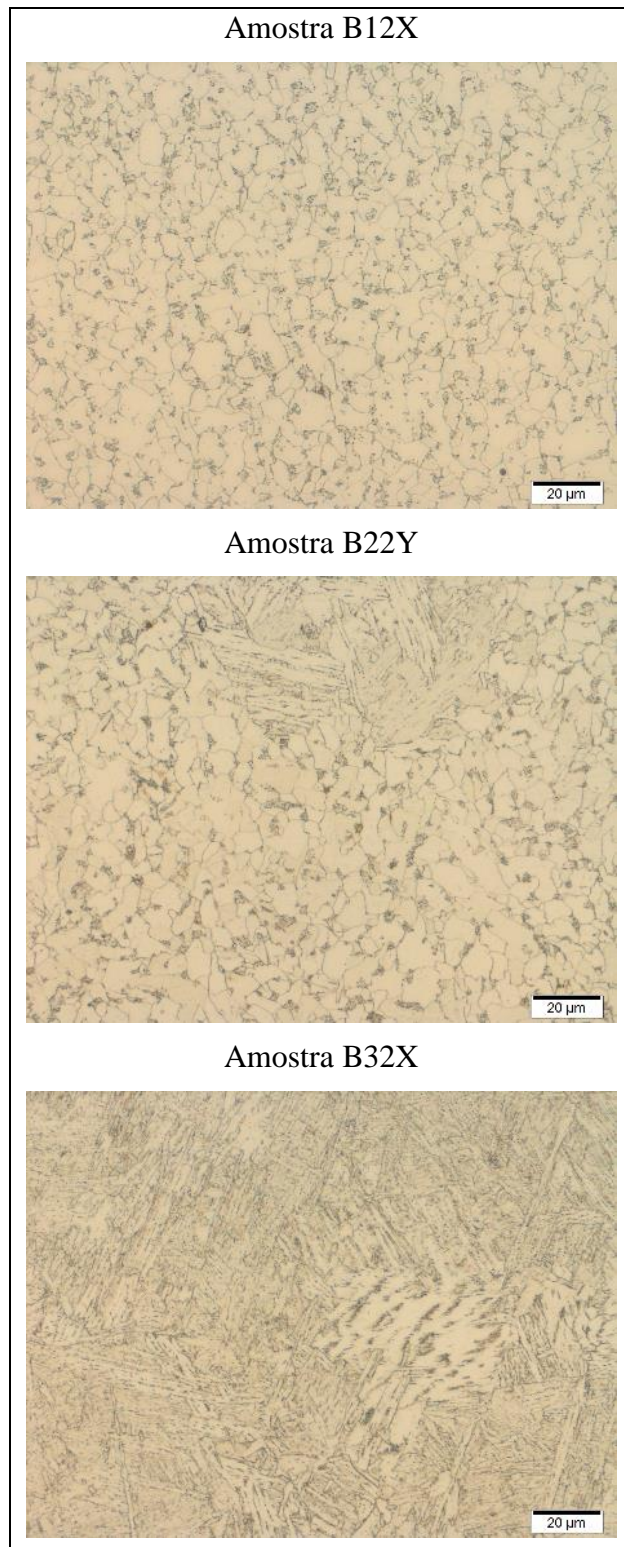


FIG. 4.37 Micrografias de amostras revenidas do Fabricante B. Aumento de 1000X.

A microestrutura da amostra B12X exhibe carbonetos (região escura) dispersos na matriz ferrítica (região clara), enquanto a amostra B22Y apresenta microestrutura semelhante, acrescentando ainda uma fração de martensita em sua composição, o que reforça as observações em torno das temperaturas de encharque de 880 e 920°C que não foram capazes de realizar uma

completa austenitização no aço B, ao passo que a temperatura de 960°C, representado pela amostra B32X, exibe uma distribuição considerável de martensita revenida.

O material do Fabricante B não apresentou crescimento de grão excessivo e isto favorece a formação de martensita para maiores temperaturas de encharque e, portanto, incremento da resistência mecânica em função do aumento desta temperatura.

Os resultados levantados neste trabalho apontam a temperatura de encharque de 880 e 920°C como as mais adequadas para o tratamento de têmpera do Fabricante A. Enquanto a temperatura de encharque de 960°C é a mais indicada para o Fabricante B. É observado ainda que temperaturas de revenido entre 530 e 670°C apresentam contribuições, em termos de propriedades mecânicas, relativas ao tratamento de têmpera anterior. Em um estudo realizado por Oliveira (2014) para esta classe de materiais, no que refere-se as propriedades mecânicas, as rotas de ciclos térmicos apontaram, nesta ordem, a temperatura de encharque de 920 e de 960°C, ambas associadas ao revenido em 600°C, como as mais apropriadas para melhor desempenho mecânico, tornando-se compatível com os resultados obtidos nesta dissertação.

O teor de carbono equivalente calculado através da equação de Ito e Bessyo (1968) é de 0,191 para o Fabricante A e de 0,178 para o Fabricante B, os valores são ligeiramente diferentes e conferem maior temperabilidade, induzindo maior facilidade na formação de martensita, conforme observado nas micrografias analisadas para as temperaturas avaliadas, e resistência mecânica conforme descrito pelos ensaios de tração e dureza para o aço A.

Foi destacado anteriormente que a variação da temperatura de revenido propicia maior resistência mecânica ao aço do Fabricante A entre 540 a 590°C, ao passo que esse comportamento também é visualizado para o Fabricante B, mas não produz efeito considerável na resistência mecânica. Essas descrições podem ser mensuradas através dos gráficos de efeito médio e de contorno.

5 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados e discussões desta dissertação, pode-se destacar algumas conclusões:

Fabricante A

- As amostras na condição recebida do Fabricante A apresentam conformidade com a norma API 5L para a classe de aços X65;
- As amostras temperadas a partir de 880°C e revenidas em 530 e 600°C bem como as amostras com temperatura de encharque de 920°C e revenidas em 670°C foram as que exibiram propriedades mecânicas que atendem os requisitos da norma API 5L.

Fabricante B

- As amostras recebidas do Fabricante B não atenderam os requisitos da norma API 5L para o grau X65;
- As amostras temperadas a partir de 960°C e revenidas em 530 e 600°C apresentam resultados de limite de escoamento, resistência à tração e alongamento percentual condizentes com os normatizados pela API 5L;
- Os modelos de regressão em conjunto com os gráficos de contorno apontam as temperaturas de encharque de 960°C e de revenido em 530°C como as mais adequadas para o tratamento térmico para o tubo do Fabricante B, conferindo propriedades mecânicas em conformidade com a norma API 5L.

Para ambos os fabricantes

- Nas condições de trabalho, em escala laboratorial, a variação da temperatura da água na têmpera não ofereceu mudança significativa na severidade de resfriamento;
- As medidas de dureza são condizentes com os valores obtidos através dos ensaios de tração;
- Dentre os parâmetros de tratamento térmico avaliados, o material do Fabricante A é o mais indicado para uso, pois é mais resistente mecanicamente e possui ductilidade necessária para conformidade com a norma API 5L para os aços X65.

Planejamento experimental

- A metodologia de planejamento experimental permitiu a redução do número de ensaios sem prejudicar as avaliações para otimização dos parâmetros de tratamento térmico;
- O delineamento experimental se mostrou eficaz e pode ser usado para análise de processos termomecânicos para as diversas classes de materiais;
- Os modelos de regressão gerados são capazes de estimar as propriedades mecânicas para ambos os Fabricantes com forte correlação com os resultados experimentais.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Caracterização dos microconstituintes dos aços dos Fabricantes A e B através de microscopia ótica usando LePera e microscopia eletrônica de varredura
- Realização do ensaio de impacto Charpy nas amostras recebidas, temperadas e revenidas de ambos os fabricantes
- Simulação no *software* Thermo-Calc[®] dos diagramas de fases, em função da composição química, dos aços A e B
- Levando em conta que o curvamento é um processo de deformação a quente associada a uma têmpera parcial, é interessante realizar uma avaliação das propriedades mecânicas das amostras oriundas de trechos retos em comparação com as regiões curvados dos tubos
- Usar o método DMS (diferença mínima significativa) para comparar os dados das propriedades mecânicas

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. **Banco de dados de exploração e produção**. 2015. Disponível em <http://www.bdep.gov.br/?id=441>.
- AMERICAN INSTITUTE OF PETROLEUM – API Specification 5L. **Specification for Line Pipe**. 45ª Edição. Washington, DC. EUA. 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. ASTM A370. Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. 2014.
- BALASUBRAMANIAN, M. **Application of Box–Behnken Design for Fabrication of Titanium Alloy and 304 Stainless Steel Joints With Silver Interlayer by Diffusion Bonding**. Materials and Design, v. 77, pp.161-169. 2015.
- BEZERRA, M. A.; SANTELLI, R. E.; OLIVEIRA, E. P.; VILLAR, L. S.; ESCALEIRA, L. A. **Response Surface Methodology (RSM) as a Tool for Optimization in Analytical Chemistry**. Talanta, v. 76, pp. 965-977. 2008.
- BOX, G. E. P.; BEHNKEN, D. W. **Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables**. Technometrics, v. 2, no. 4, pp. 455-475. 1960
- CALDEIRA, E, A. **Processamento de um Aço ABRL no Laminador de Tiras a Quente da CST Visando Atender a Norma API 5L, Grau X70**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2006.
- EBRAHIMIFAR, H.; ZANDRAHIMI, M.; NIKROOZ, B.; SEDIGHI, M. **Production of Cobalt anti-corrosion Coating on AISI 430 steel – Optimization Using Box-Behnken Experimental Designs**. Indian Journal of Chemical Technology, v. 20, pp. 40-45. 2013.
- EL-DANAF, E.; BAIG, M.; ALMAJID, A.; ALSHALFAN, W.; AL-MOJIL, M.; AL-SHAHRANI, S. **Mechanical, Microstructure and Texture Characterization of API X65 Steel**. Materials and Design, v. 47, pp. 529-538. 2013.
- FERREIRA, S. L. C.; BRUNS, R.E.; FERREIRA, H.S.; MATOS, G.D.; DAVID, J.M.; BRANDÃO, G.C.; DA SILVA, E.G.P.; PORTUGAL, L.A.; DOS REIS, P.S.; SOUZA, A.S.; DOS SANTOS, W.N.L. **Box-Behnken Design: An Alternative for the Optimization of Analytical Methods**. Analytica Chimica Acta, v. 597, pp. 179-186. 2007.
- GUIMARÃES, V.A. **Influência da Taxa de Resfriamento nas Propriedades Mecânicas e no Micromecanismo de Fratura de um Aço Microligado com Nióbio e Titânio**. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 1997.
- HASHEMI, S. H.; **Strength-hardness Statistical Correlation in API X65 Steel**. Materials Science and Engineering A, v. 528, pp. 1648-1655. 2011.

- HILLENBRAND, H. G., GRAF, M., KALWA, C. **Development and Production of High Strength Pipeline Steels**. In: Niobium Science & Technology: Proceedings of the International Symposium Niobium 2001. Orlando. EUA. 2001.
- HILLENBRAND, H. G., LIESSEM, A., BIERMANN, K., HECKMANN, C. J., SCHWINN, V. **Development of Grade X120 Pipe Material for High Pressure Gas Transportation Lines**. In: 4th International Conference on Pipeline Technology. Ostend. Bélgica. 2004.
- HIPPERT JÚNIOR, E. **Investigação Experimental do Comportamento Dúctil de Aço API X70 e aplicação de Curva de Resistência J- Δ a para previsão de Colapso em Dutos**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2004.
- ITO, Y.; BESSYO, K. **Weldability Formula of High Strength Steels Related to Heat-Affected-Zone Cracking**. International Institute for Welding. 1968.
- KRAUSS, G.; THOMPSON, W. **Ferritic microstructures in continuously cooled low-and ultralow-carbon steel**. ISIJ Internacional, v. 35, n. 8, pp. 937-945. 1995.
- MEIRELES, A. M. **Avaliação dos Parâmetros de Curvamento por Indução em Tubos da Classe API 5L X80**. Dissertação de mestrado, Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro. 2009.
- MOHTADI-BONAB, M. A.; SZPUNAR, J. A.; COLLINS, L.; STANKIEVECH, R. **Evaluation of Hydrogen Induced Cracking Behavior of API X70 Pipeline Steel at Different Heat Treatments**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 39, pp.6076-6088. 2014.
- MONTE, I. R. **Caracterização Microestrutural do Aço API 5L X65 Soldado por Feixe de Elétrons com Diferentes Aportes Térmicos**. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo. Lorena. 2013.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G.C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 5 ed. LTC. Rio de Janeiro, 2012.
- OGATA, P.H; RAMÍREZ, M. G; GOLDENSTEIN, H.; GORNI, A. A.; LANDGRAF, F. J. G. **Caracterização Microestrutural de Aço API 5L X-65, Austenitizado e Resfriado a Diferentes Taxas de Resfriamento**. Contribuição técnica ao 18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência de Materiais – CBECiMat. Porto de Galinhas, Brasil, 2008.
- OGATA, P. H. **Caracterização Microestrutural do Aço para Tubo API 5L X-65 em Diferentes Regiões da Chapa como Laminada e após Austenitização e Resfriamento sob Diversas Taxas de Resfriamento**. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2009.
- OLIVEIRA, R. V. **Tratamento Térmico de um Tubo De Aço API 5L X65 Utilizado em Curvamento por Indução**. Dissertação de mestrado, Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro. 2014.
- SANT'ANNA, P. C. **Influência de Tratamentos Térmicos Intercríticos na Microestrutura e Propriedades Mecânicas do Aço API 5L X65**. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2006.

- SOARES, W.R.; TRINDADE, V.B.; FARIA, G.L.; COTA, A.B.; **Avaliação da temperabilidade, microestrutura e tenacidade de tubos de aço especificados pela norma API 5CT.** Contribuição técnica ao 70º Congresso Anual da ABM – Internacional. Rio de Janeiro, Brasil, 2015.
- TORRICO, I. F. A. **Tenacidade à Fratura em Condições Elasto-Plásticas com Corpos de Prova Não Normalizados para Aços API 5L: Análise Numérica e Experimental.** Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2006.
- WISKEL, J.B.; MA, J.; IVEY, D. G.; HENEIN, H.; **An Investigation of Aging Behaviour in Microalloyed Steel (X70) UOE Pipe.** In: HSLA Steels 2015, Microalloying 2015 & Offshore Engineering Steels 2015: Conference Proceedings, ch. 87. 2015.
- XUN, W.; JIE, Z.; QIANG, L.; **Multi-objective Optimization of Medium Frequency Induction Heating Process for Large Diameter Pipe Bending.** Procedia Engineering, v. 81, pp. 2255-2260. 2014.
- ZHANG, X.; GAO, H.; ZHANG, X.; YANG, Y.; **Effect of Volume Fraction of Bainite on Microstructure and Mechanical Properties of X80 Pipeline Steel with Excellent Deformability.** Materials Science and Engineering A, v. 531, pp. 84-90. 2012.
- ZHAO, M.; YANG, K.; XIAO, F.; SHAN, Y.; **Continuous Cooling Transformation of Undeformed and Deformed Low Carbon Pipeline Steels.** Materials Science and Engineering A, v. 355, pp.126-136, 2003.