

ANTONIO VASSALO SALES GÓZ

Estudo comparativo das propriedades mecânicas dos tubos quadrados laminados a quente com os conformados a frio com tratamento térmico de alívio de tensão

ANTONIO VASSALO SALES GÓZ

Estudo comparativo das propriedades mecânicas dos tubos quadrados laminados a quente com os conformados a frio com tratamento térmico de alívio de tensão

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira

Guaratinguetá - SP
2018

G725e Góz, Antonio Vassalo Sales
Estudo comparativo das propriedades mecânicas dos tubos quadrados laminados a quente com os conformados a frio com tratamento térmico de alívio de tensão / Antonio Vassalo Sales Góz. – Guaratinguetá, 2018.
66 f : il.
Bibliografia: f. 63-65

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018.
Orientador: Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira

1. Laminação (Metalurgia). 2. Conformação de metais. 3. Tubos - Propriedades mecânicas I. Título.

CDU 621.771(043)

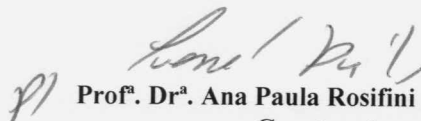
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO

DE

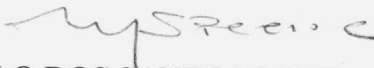
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA

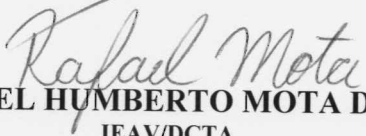
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Ana Paula Rosifini Alves Claro
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MARCELO DOS SANTOS PEREIRA
Orientador / UNESP/FEG


Prof. Dr. ANTONIO JORGE ABDALLA
IEAV/DCTA


Prof. Dr. RAFAEL HUMBERTO MOTA DE SIQUEIRA
IEAV/DCTA

Dezembro de 2018

DADOS CURRICULARES

ANTONIO VASSALO SALES GÓZ

NASCIMENTO	13.03.1984 – Itajubá / MG
FILIAÇÃO	Rogério Sales Góz Valéria Vassalo Góz
2007/2010	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica FEG/UNESP

Dedico este trabalho ao meu pai, grande incentivador pela busca constante de conhecimento, a minha mãe e, de modo especial, ao meu filho Guilherme para que o seu futuro seja melhor.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, sem a luz divina certamente este trabalho ficaria com menos brilho,

à minha esposa *Ana* pela compreensão e apoio no cuidado de nosso filho durante as muitas horas dedicadas a este projeto,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira*, pela sua orientação e auxílio,

à empresa Liebherr pelo fornecimento do material utilizado na pesquisa e em especial, ao *Sr. Jorge Gobbo* pela compreensão e apoio e ao *Sr. Robert Bramberger* pela colaboração técnica,

ao colega *Antônio Faria* pelo seu inestimável auxílio na metalografia e no ensaio de impacto,

ao *Eng.º Marco Aurélio Lima Cupertino* e aos técnicos da Gerência de Serviços e Suporte Tecnológico de FURNAS Centrais Elétricas S.A. pela viabilização do ensaio de compressão,

aos funcionários e funcionárias da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, com destaque ao técnico *Odir Vieira da Silva* e ao *Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento* por toda a ajuda prestada.

O presente trabalho foi realizado com apoio da
Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível
Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Quando uma criatura humana desperta para um grande sonho e sobre ele lança toda a força de sua alma, todo o universo conspira a seu favor.”

J. Goethe

RESUMO

O uso de perfis tubulares estruturais, sejam eles de seção circular, quadrada ou retangular, na construção civil ou em equipamentos mecânicos ainda é incipiente no Brasil. Isto se deve, entre outros fatores, ao baixo número de pesquisas nacionais sobre o tema. Para contribuir neste campo, este trabalho teve o objetivo de realizar um estudo comparativo entre seções quadradas laminadas a quente com as conformadas a frio, pois, no Brasil, a maior parte dos tubos são fabricados por conformação a frio e também por haver grande interesse internacional pela comparação direta entre os perfis produzidos por estes dois processos distintos. Para isto, análises dimensionais da seção transversal, das composições químicas e metalográficas e ensaios de dureza por microindentação, de impacto Charpy, de tração e de compressão foram realizados em tubos de 80x80x10 mm de aço carbono para aplicação estrutural com tensão de escoamento mínima de 355 MPa. Os resultados demonstraram que o tubo conformado a frio com posterior tratamento térmico de alívio de tensão possui área de seção transversal 2,7% menor, distribuição de dureza e propriedades mecânicas praticamente uniformes na seção transversal, ótima tenacidade em baixas temperaturas e maior resistência à tração e à compressão quando comparado com a mesma seção laminada a quente. Portanto, para a seção analisada, ficou comprovada a equivalência estrutural dos tubos laminados a quente com os conformados a frio com posterior alívio de tensão por tratamento térmico.

PALAVRAS-CHAVE: Perfis tubulares estruturais. Laminação a quente. Conformação a frio. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

The use of hollow structural sections, be them circular, square or rectangular hollow section, at civil construction or at mechanical equipment is still incipient in Brazil. This is due, among other factors, the low number of national researches about the matter. To contribute in this field, this work had the goal to realize a comparative study between square hollow sections hot rolled with the cold formed because most tubes are produced by cold forming in Brazil and also because the great international interesting for the direct comparison between the profiles produced by these two different processes. For this, cross section dimension, chemical composition and metallographic analyzes and microindentation hardness, Charpy impact, tension and compression tests were realized in tubes of 80x80x10 mm of carbon steel for structural application with minimum yield stress of 355 MPa. The results demonstrated that the cold formed tube with subsequent heat treatment of stress relieve has cross sectional area 2,7% lower, uniform hardness distribution and mechanical properties in the cross section, great toughness at low temperatures and higher tension and compression resistance when compared with the same section hot rolled. Therefore, for the section analyzed, was proved the structural equivalence of the hot rolled tubes with the cold formed plus stress relieve by heat treatment.

KEYWORDS: Hollow structural sections. Hot rolling. Cold forming. Mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - O bambu: (a) como encontrado na natureza; (b) em uma construção na Indonésia	15
Figura 2 - Cobertura de estrutura tubular em um shopping de Salvador.....	16
Figura 3 – Comparação da massa de diversos perfis sob compressão em relação a carga	16
Figura 4 - Superfície de pintura para perfis tubulares, cantoneiras e vigas I	17
Figura 5 - Fabricação de tubos circulares: (a) soldado por indução;.....	17
Figura 6 - Laminação a quente de tubos quadrados	18
Figura 7 - Processos de conformação: (a) contínua; (b) direta.....	18
Figura 8 - Distribuição de dureza nas seções transversais: (a) tubo LQ; (b) tubo CF.....	22
Figura 9 - Arranjo geral para medição da tensão residual	23
Figura 10 - Distribuição das tensões residuais (MPa) nas direções transversais e longitudinais: (a) tubo LQ; (b) tubo CF com alívio de tensão; (c) tubo CF sem alívio de tensão..	24
Figura 11 - Distribuição das tensões residuais longitudinais na espessura dos tubos CF	25
Figura 12 - Guindaste de torre sujeito a baixíssimas temperaturas na Alemanha	26
Figura 13 - Típica curva energia absorvida-temperatura e relação com a forma de fratura em componentes de aço	27
Figura 14 - Alteração na T_{27J} devido a conformação a frio para o aço S355J2.....	28
Figura 15 - Variação da energia de impacto em função da temperatura para diferentes rotas de processamento e tipos de aço	29
Figura 16 - Típicos modos de falha por flambagem: (a) localizada;.....	31
Figura 17 - Curvas europeias de flambagem.....	32
Figura 18 - Tubos utilizados na pesquisa com dimensão nominal de 80x80x10 mm.....	34
Figura 19 - Identificação das medidas geométricas realizadas nas amostras	35
Figura 20 - Identificação dos 16 pontos de medição da espessura das amostras	35
Figura 21 - Amostras dos ensaios de metalografia.....	36
Figura 22 - Microscópio óptico Nikon EPIPHOT 200.....	37
Figura 23 - Pontos de medição da dureza na espessura dos tubos: (a) face plana; (b) canto ...	38
Figura 24 - Microdurômetro Wilson 401 MVD	39
Figura 25 - Orientação do CP para o ensaio de impacto em relação ao tubo.....	40
Figura 26 - Equipamento para ensaio de impacto Mohr&Federhaff AG PSW 30/15.....	41
Figura 27 - Localização dos CPs para o ensaio de tração e as siglas adotadas	41
Figura 28 - CP utilizado no ensaio de tração (medidas em mm).....	42
Figura 29 - CPs de tração antes do ensaio	42

Figura 30 - Equipamento servo-hidráulico de ensaios mecânicos Instron 8801	43
Figura 31 - Exemplo para se determinar a tensão residual compressiva longitudinal máxima baseado no resultado do ensaio de compressão	44
Figura 32 - Prensa MARUTO utilizada no ensaio de compressão.....	45
Figura 33 - Arranjo geral para o ensaio de compressão	46
Figura 34 - Desvio da espessura em relação ao valor nominal (valores em mm).....	47
Figura 35 - Microestruturas das amostras: (a) LQ-P; (b) LQ-C; (c) CF-P; (d) CF-C (ampliação de 200X).....	49
Figura 36 - Microestruturas das amostras: (a) LQ-P; (b) LQ-C; (c) CF-P; (d) CF-C (ampliação de 500X).....	50
Figura 37 - Distribuição da dureza através da seção transversal dos tubos.....	51
Figura 38 - Dureza em diferentes pontos da espessura das amostras.....	52
Figura 39 - Energia absorvida em função da temperatura para os diferentes tubos.....	53
Figura 40 - Aspecto das fraturas das amostras: (a) LQ a 21 °C; (b) CF a 21 °C; (c) LQ a 0 °C; (d) CF a 0 °C; (e) LQ a -17 °C; (f) CF a -17 °C; (g) LQ a -74 °C; (h) CF a -74 °C..	53
Figura 41 - CPs de tração após o ensaio.....	55
Figura 42 - Curvas tensão-deformação das amostras: (a) das faces planas; (b) dos cantos	56
Figura 43 - Falha típica de flambagem apresentada pelos tubos: (a) LQ; (b) CF	58
Figura 44 - Curva tensão-deformação típica do tubo LQ obtida no ensaio de compressão	59
Figura 45 - Curva tensão-deformação típica do tubo CF obtida no ensaio de compressão	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação de preços (em €/m) entre os tubos LQ e CF na Alemanha.....	21
Tabela 2 - Seleção da curva de flambagem para seções tubulares	31
Tabela 3 - Propriedades mecânicas do aço S355J2H	33
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do aço St 52.....	33
Tabela 5 - Composição química dos aços S355J2H e St 52.....	33
Tabela 6 - Dimensões da seção transversal dos tubos e respectivas tolerâncias	47
Tabela 7 - Composição química dos tubos LQ e CF	48
Tabela 8 - Resultados do ensaio de tração.....	57
Tabela 9 - Resultados do ensaio de compressão.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CE	Carbono equivalente
CF	Conformado a frio
CHS	Circular hollow section
CIDECT	Comité International pour le Développement et l'Étude de la Construction Tubulaire
CP	Corpo de prova
HSS	Hollow structural section
LQ	Laminado a quente
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
RHS	Rectangular hollow section
SHS	Square hollow section
TF	Temperatura frágil
TTDF	Temperatura de transição dúctil/frágil

LISTA DE SÍMBOLOS

σ_r	tensão residual
σ_e	tensão de escoamento
σ	tensão
ε	deformação
λ	esbeltez
l_f	comprimento de flambagem
r	raio de giração
χ	coeficiente de redução curvas de flambagem
σ_{crf}	tensão crítica de flambagem elástica
$\bar{\lambda}$	esbeltez adimensional
λ_E	esbeltez de Euler
E	módulo de elasticidade do material (ou módulo de Young)
σ_{mrt}	tensão máxima de resistência à tração
L_0	comprimento inicial
h	altura da seção transversal do tubo quadrado
b	largura da seção transversal do tubo quadrado
R_e	raio externo do tubo quadrado
R_i	raio interno do tubo quadrado
σ_{mrc}	tensão máxima de resistência à compressão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	OBJETIVO	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	VARIAÇÃO DE DUREZA	22
3.2	TENSÕES RESIDUAIS.....	23
3.3	TENACIDADE	26
3.4	RESISTÊNCIA AO CARREGAMENTO ESTÁTICO	30
3.4.1	Resistência à tração	30
3.4.2	Resistência à compressão.....	30
4	MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1	MATERIAL UTILIZADO.....	33
4.2	METODOLOGIA UTILIZADA.....	34
4.2.1	Análise dimensional	34
4.2.2	Análise da composição química	35
4.2.3	Análise metalográfica.....	36
4.2.3.1	Preparação metalográfica.....	37
4.2.4	Ensaio de dureza por microindentação	38
4.2.5	Ensaio de impacto Charpy	39
4.2.6	Ensaio de tração	41
4.2.7	Ensaio de compressão.....	43
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5.1	ANÁLISE DIMENSIONAL	47
5.2	ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA	48
5.3	ANÁLISE METALOGRÁFICA.....	49
5.4	ENSAIO DE DUREZA POR MICROINDENTAÇÃO.....	50
5.5	ENSAIO DE IMPACTO CHARPY	52
5.6	ENSAIO DE TRAÇÃO.....	55
5.7	ENSAIO DE COMPRESSÃO	57
6	CONCLUSÕES	61
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	62
	REFERÊNCIAS.....	63
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	66

1 INTRODUÇÃO

Os perfis tubulares estruturais, *hollow structural sections* (HSS), ou perfis estruturais de seção oca na tradução livre do inglês, já são usados há muito tempo nos países desenvolvidos, tanto em construções quanto em equipamentos mecânicos. A forma tubular metálica criada pelo homem foi inspirada em um material da natureza, o bambu, que até os dias atuais segue revelando as suas potencialidades como elemento estrutural em diversas construções ecológicas, Figura 1.

Figura 1 - O bambu: (a) como encontrado na natureza; (b) em uma construção na Indonésia



(a)



(b)

Fonte: Ibuku (2018a) e Ibuku (2018b)

No Brasil, as estruturas tubulares são uma tendência mais recente na construção civil, resultado do fortalecimento e incentivo da indústria de base, influência da arquitetura moderna como pode ser visto na Figura 2 e também resultado das pesquisas nacionais neste campo que geram conhecimento e segurança na aplicação de novas soluções.

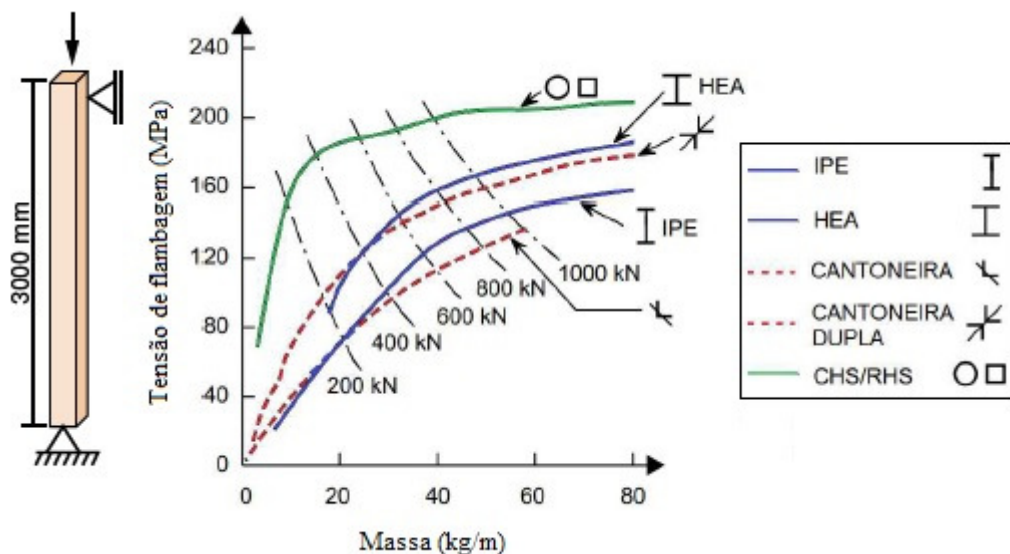
Figura 2 - Cobertura de estrutura tubular em um shopping de Salvador



Fonte: Estruturas Tubulares (2018)

Inúmeras são as vantagens dos perfis tubulares em relação aos demais perfis metálicos ou ao concreto. Devido à geometria da sua seção transversal, eles resistem bem aos esforços de compressão, de torção e efeitos combinados, e ainda, se for necessário, podem ser preenchidos com concreto para ganhar ainda mais resistência à compressão e melhorar a sua resistência ao fogo. Eles propiciam também estruturas mais leves e econômicas tendo em vista a sua ótima relação resistência-peso próprio. Como ilustrado na Figura 3, a massa dos tubos circulares e quadrados será menor em comparação aos demais perfis para resistir a uma dada carga considerando uma viga de 3 m de comprimento sob compressão axial.

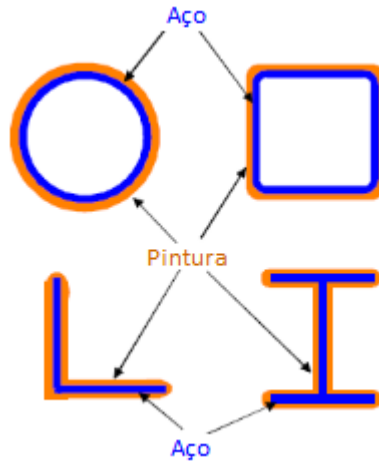
Figura 3 – Comparação da massa de diversos perfis sob compressão em relação a carga



Fonte: Adaptado de Wardenier et al. (2010)

Adicionalmente, comparando-os aos perfis abertos, os perfis tubulares necessitam de menor volume de tinta ou outra proteção superficial devido a sua menor área externa, Figura 4.

Figura 4 - Superfície de pintura para perfis tubulares, cantoneiras e vigas I

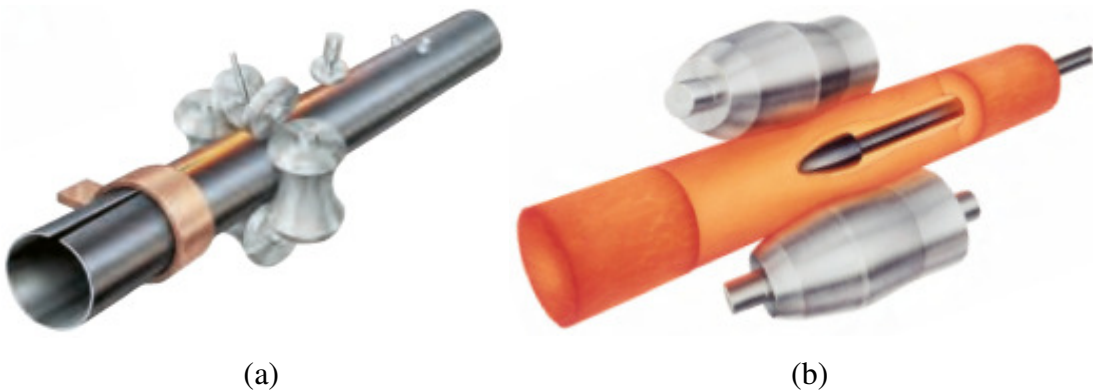


Fonte: Wardenier et al. (2010)

Mendes (2008, p. 1) ressalta que “Além dos aspectos estruturais, com a arquitetura contemporânea valorizando a estrutura aparente, a solução com perfis tubulares dá às construções uma aparência mais leve e dinâmica.”

Os tubos de aço de seção circular, *circular hollow section* (CHS), podem ser fabricados com ou sem costura, ou seja, podem ser produzidos a partir de chapas dobradas e soldadas nas suas extremidades ou por laminação a quente a partir de um cilindro maciço perfurado por um mandril, Figura 5.

Figura 5 - Fabricação de tubos circulares: (a) soldado por indução;
(b) laminado com perfurador



Fonte: Vallourec (2012)

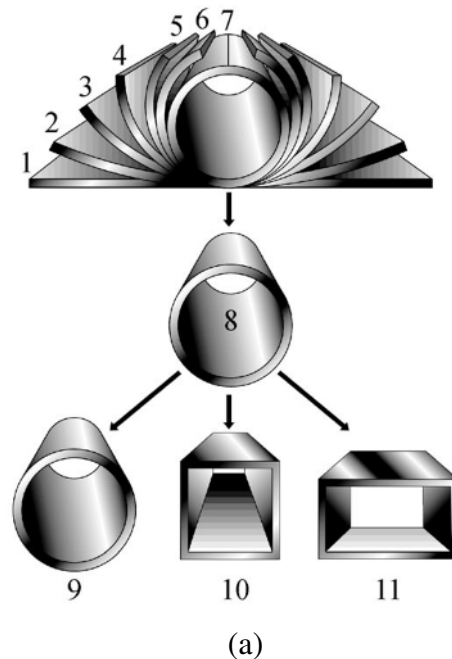
A partir do perfil circular podem ainda serem produzidos tubos quadrados, *square hollow section* (SHS), ou retangulares, *rectangular hollow section* (RHS), por laminação a quente, *hot rolling*, Figura 6, ou conformação a frio, *cold forming*. Este processo de fabricação é denominado conformação contínua, *continuous forming*, pois existe também o processo de conformação direta, *direct forming*, em que se conforma a forma quadrada ou retangular diretamente de chapas planas, utilizando-se a solda para unir as extremidades e fechar a seção (SUN; PACKER, 2014), Figura 7. Praticamente a totalidade dos fabricantes na América do Norte, Europa, Japão e Austrália utilizam o processo de conformação contínua enquanto que na China, a técnica de conformação direta se tornou o método de fabricação dominante para os SHS e RHS de grandes dimensões (SUN; PACKER, 2017).

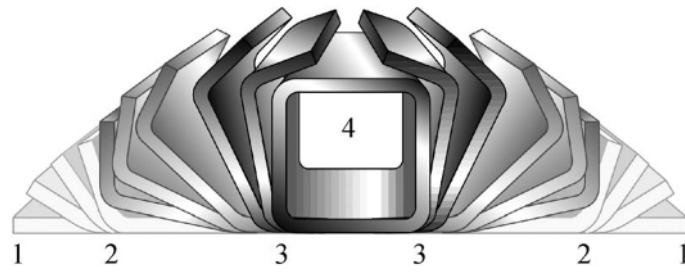
Figura 6 - Laminação a quente de tubos quadrados



Fonte: Vallourec (2012)

Figura 7 - Processos de conformação: (a) contínua; (b) direta





(b)

Fonte: Sun e Packer (2017)

Inicialmente a técnica de conformação a frio era limitada a fabricação de perfis de até 3 mm de espessura, porém, atualmente ela já permite a produção de tubos quadrados de seção de 800x800 mm com espessura de até 22 mm (LIU et al., 2016).

Quando requerido, os tubos estruturais conformados a frio (CF) são tratados termicamente por normalização ou alívio de tensão para obterem propriedades metalúrgicas equivalentes aos laminados a quente (LQ).

2 OBJETIVO

Este estudo tem por objetivo realizar uma comparação direta das propriedades mecânicas dos tubos quadrados laminados a quente com os conformados a frio com posterior tratamento térmico de alívio de tensão. Para atingir o objetivo proposto e para se compreender melhor as diferenças geradas pelos distintos processos de fabricação, foram realizadas análises dimensionais da seção transversal, das composições químicas e metalográficas e ensaios de dureza por microindentação, de impacto Charpy, de tração e de compressão.

A partir dos resultados obtidos pretende-se estabelecer critérios claros de equivalência e condições de uso em termos de tenacidade a baixas temperaturas, resistência à tração e à compressão.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os tubos estruturais produzidos por conformação a frio são em geral mais facilmente encontrados no mercado por possuírem maior número de fabricantes e são também mais econômicos. Segundo Puthli e Packer (2013), na Alemanha os tubos quadrados LQ conforme a European standard-EN 10210-1 (2006) chegam a custar entre 24% e 54% a mais que os CF conforme EN 10219-1 (2006) de mesmas dimensões, Tabela 1. Porém, convém esclarecer que a EN 10219-1 (2006) aplica-se somente aos tubos CF soldados e sem tratamento térmico posterior.

Tabela 1 - Relação de preços (em €/m) entre os tubos LQ e CF na Alemanha

Dimensões (mm)	Distribuidor A	Distribuidor B	Distribuidor C
200x200x10 (LQ) / 200x200x10 (CF)	+44%	+54%	+24%
200x200x10 (LQ) / 200x200x12,5 (CF)	+25%	+33%	+7%
150x150x6,3 (LQ) / 150x150x6,3 (CF)	+52%	+30%	+37%
150x150x6,3 (LQ) / 150x150x8,0 (CF)	+23%	+5%	+10%

Fonte: Adaptado de Puthli e Packer (2013)

A conformação a frio ocorre em temperaturas relativamente baixas em relação a temperatura de fusão do metal, encruando o material e produzindo um ganho de resistência mecânica com conseqüente diminuição da ductilidade (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). Adicionalmente, nas seções tubulares quadradas e retangulares tem-se uma concentração de deformação plástica nos cantos que tipicamente resulta em tensões residuais, diferentes propriedades mecânicas e uma irregular distribuição de dureza ao redor da seção transversal do perfil. Segundo Liu et al. (2018), as propriedades mecânicas destas seções também são consideravelmente influenciadas pelo processo de conformação a frio empregado. Os efeitos negativos do trabalho a frio serão menores no processo de conformação contínua. Por exemplo, na conformação direta a tensão de escoamento chega a ser de 30 a 50% maior nos cantos em comparação com as faces plana. Já na conformação contínua esta diferença não é tão expressiva e as propriedades mecânicas serão, portanto, mais homogêneas na seção transversal.

Em relação a laminação a quente, essa é realizada acima da temperatura de recristalização do material, normalmente ao redor dos 850 °C (CALLISTER; RETHWISCH,

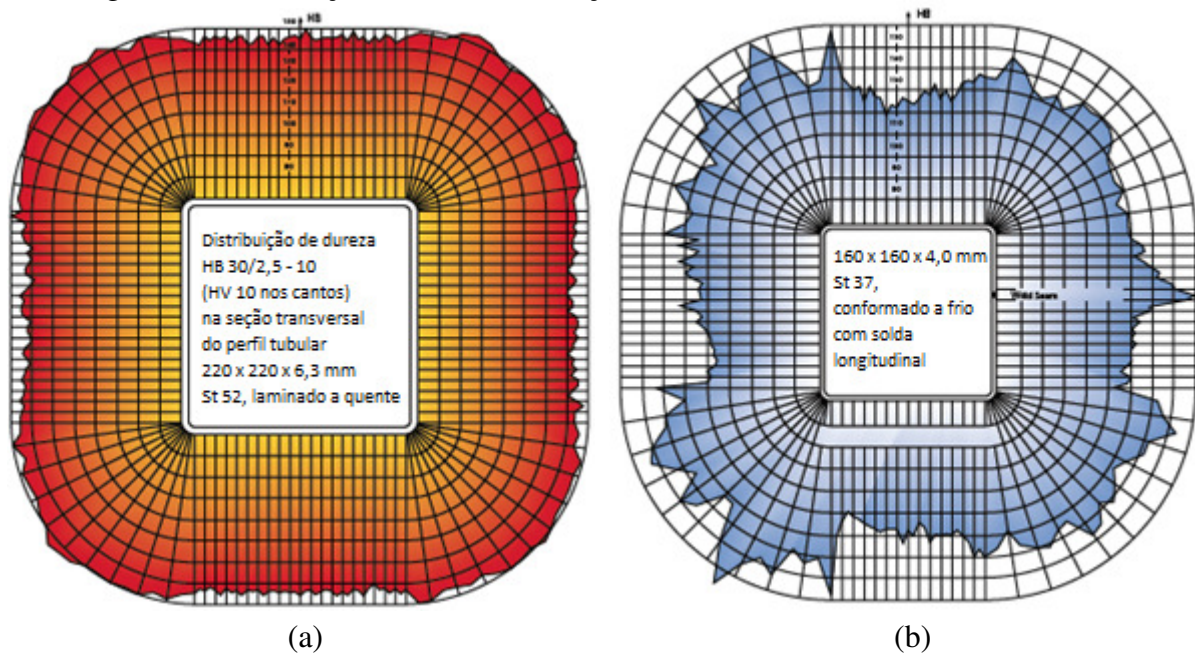
2016). Dessa forma, as seções resultantes deste processo terão propriedades mecânicas homogêneas na seção transversal, boa ductilidade e relativamente baixas tensões residuais (GARDNER; SAARI; WANG, 2010). Comparativamente, a maior ductilidade das seções LQ em relação as CF, as tornam de certa forma mais adequadas para aplicações estruturais pois elas irão se deformar mais em condições de sobrecarga, dando assim um aviso de um risco potencial.

A seguir, apresenta-se uma síntese dos resultados de alguns estudos anteriores sobre a influência das diferentes rotas de processamento na fabricação dos tubos em termos de variação de dureza, tensões residuais, tenacidade, resistência à tração e à compressão.

3.1 VARIAÇÃO DE DUREZA

Devido ao nível variável de deformações plásticas que ocorre nos perfis CF, o encruamento do material não é uniforme e as regiões de canto são geralmente as mais afetadas (ZHU et al., 2016), apresentando picos de dureza. Por outro lado, os perfis LQ apresentam uma distribuição de dureza mais uniforme ao redor do seu perímetro. Uma comparação entre o perfil de dureza da seção transversal de tubos LQ e CF pode ser vista na Figura 8.

Figura 8 - Distribuição de dureza nas seções transversais: (a) tubo LQ; (b) tubo CF

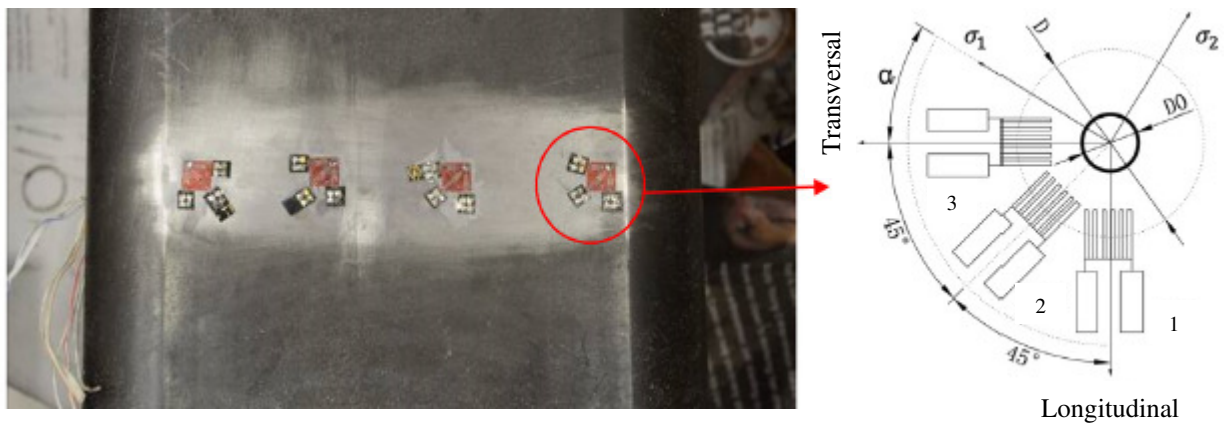


Fonte: Vallourec (2018)

3.2 TENSÕES RESIDUAIS

No estudo de Zhang et al. (2016), a tensão residual foi medida ao redor do perímetro de tubos quadrados LQ, CF com tratamento térmico de alívio de tensão e CF sem tratamento térmico posterior. Furos de 2 mm de diâmetro e 1 mm de profundidade foram feitos nas quatro faces e nos cantos dos tubos em posições determinadas e com o uso de *strain gages* mediu-se a deformação liberada. Essa deformação foi então relacionada com o alívio de tensão através de uma série de equações, obtendo-se assim a tensão residual superficial na direção transversal e longitudinal. A Figura 9 ilustra o arranjo geral deste ensaio.

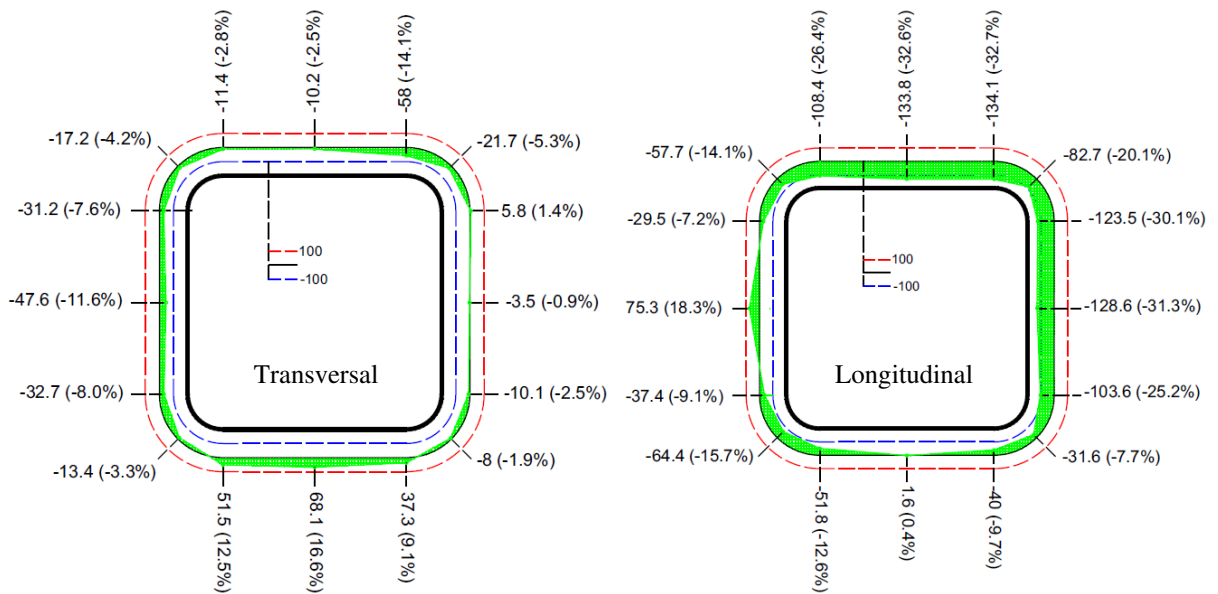
Figura 9 - Arranjo geral para medição da tensão residual



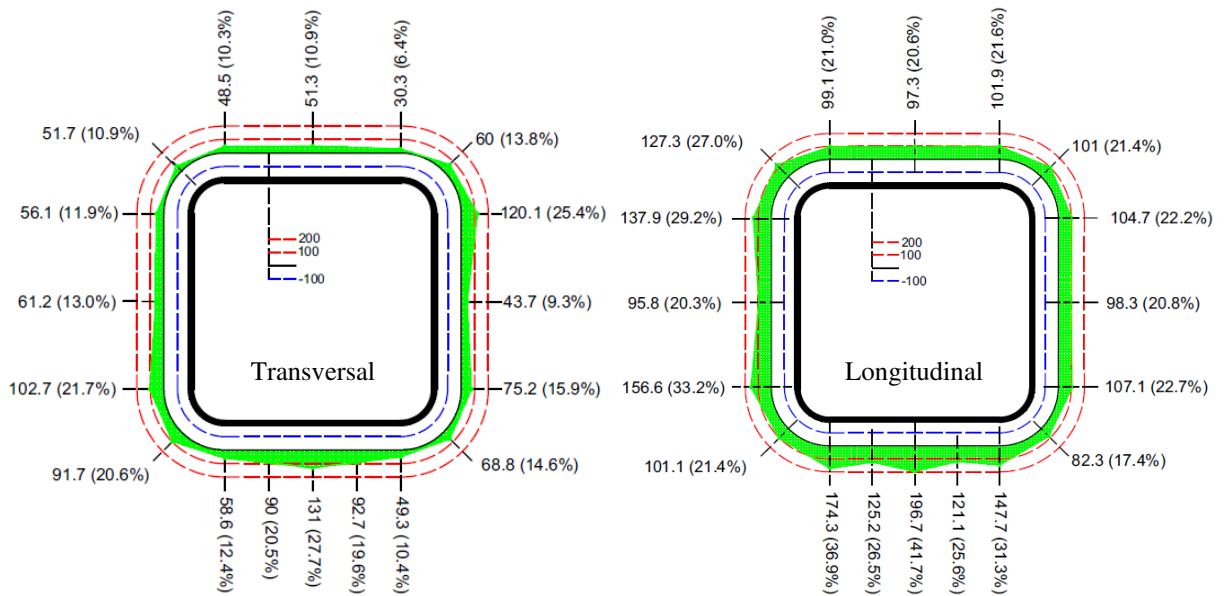
Fonte: Zhang et al. (2016)

Como pode ser observado na Figura 10, os tubos LQ possuem níveis mais baixos de tensões residuais que são majoritariamente compressivas. No tubo CF com posterior tratamento térmico as tensões passam a ser de tração e tem valores mais elevados que os tubos LQ. Porém, é no tubo CF sem alívio de tensão que as tensões residuais atingem os maiores valores, com picos nas faces planas em ambas direções, transversal e longitudinal. Estas tensões elevadas irão influenciar no comportamento estrutural do material e podem causar distorções nas peças durante o seu processamento.

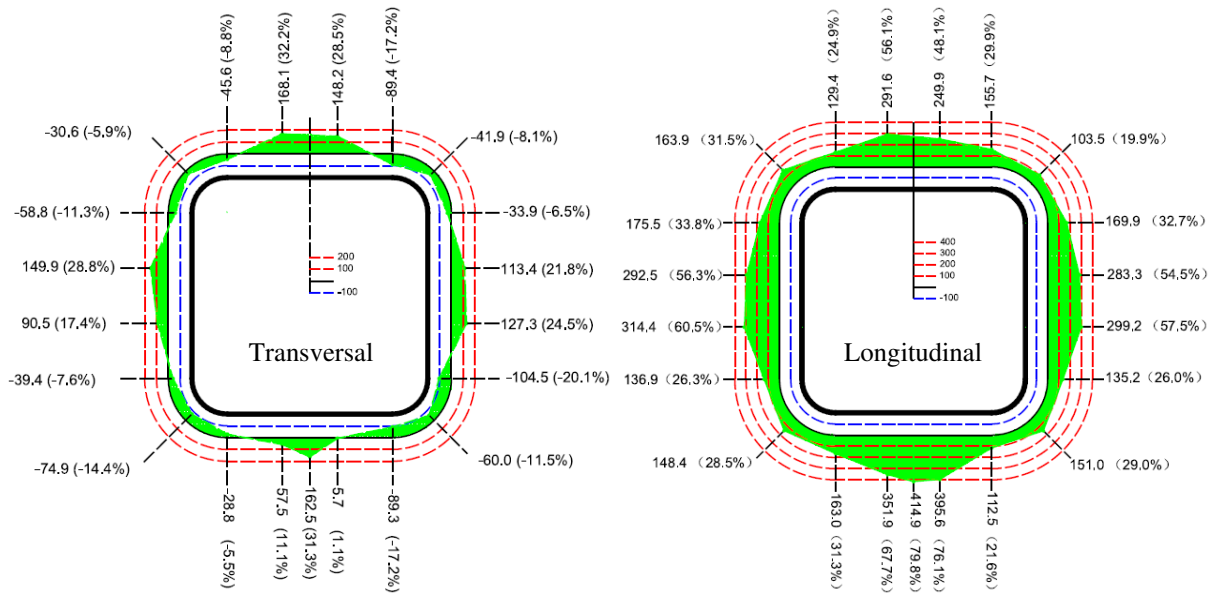
Figura 10 - Distribuição das tensões residuais (MPa) nas direções transversais e longitudinais:
 (a) tubo LQ; (b) tubo CF com alívio de tensão; (c) tubo CF sem alívio de tensão



(a)



(b)



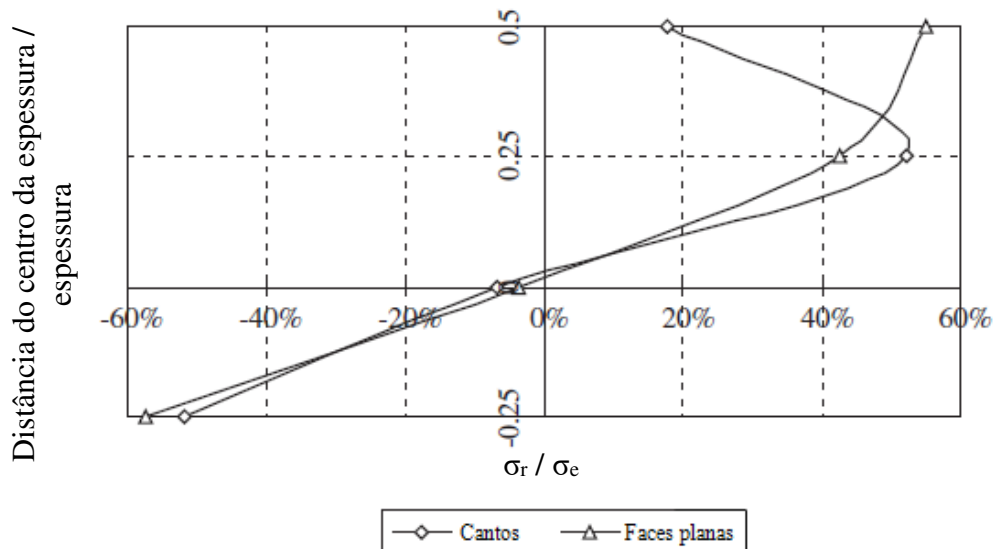
(c)

Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2016)

Nota: a porcentagem entre parênteses é a relação entre tensão residual/tensão de escoamento medida

Para os tubos quadrados CF, Tong et al. (2012) também obteve a distribuição das tensões residuais longitudinais ao longo da espessura. Os resultados indicaram que elas são de tração na superfície externa, de compressão na interna e apresentam uma distribuição não linear na espessura, Figura 11.

Figura 11 - Distribuição das tensões residuais longitudinais na espessura dos tubos CF



Fonte: Tong et al. (2012)

Segundo Packer e Sun (2013), a influência das tensões residuais na direção longitudinal é muito maior do que aquelas na direção transversal em um elemento submetido a compressão e elas provocam um escoamento prematuro, levando a uma perda de rigidez e redução na capacidade de carga. Estas tensões longitudinais são geralmente divididas em dois componentes: componente de membrana que é o valor principal medido, podendo ser de tração ou compressão dependendo do local de medição, e o componente de flexão que é o desvio do valor principal, porém, é o que mais afeta o comportamento de uma seção tubular sob compressão (SUN; PACKER, 2017).

3.3 TENACIDADE

Em muitas aplicações, principalmente em países de clima frio como ilustrado na Figura 12, a estrutura tubular deve suportar as baixas temperaturas sem falhar de forma repentina e catastrófica devido a uma fratura frágil. Neste contexto, o ensaio de impacto Charpy se destaca pela sua simplicidade e baixo custo, tornando-o um requisito comum de normas e códigos internacionais para estruturas (KOSTESKI; PACKER; PUTHLI, 2005). Através deste ensaio é possível determinar a região na qual ocorre uma variação brusca na energia absorvida durante a ruptura, ou seja, a região de transição entre a fratura dúctil e a fratura frágil.

Figura 12 - Guindaste de torre sujeito a baixíssimas temperaturas na Alemanha

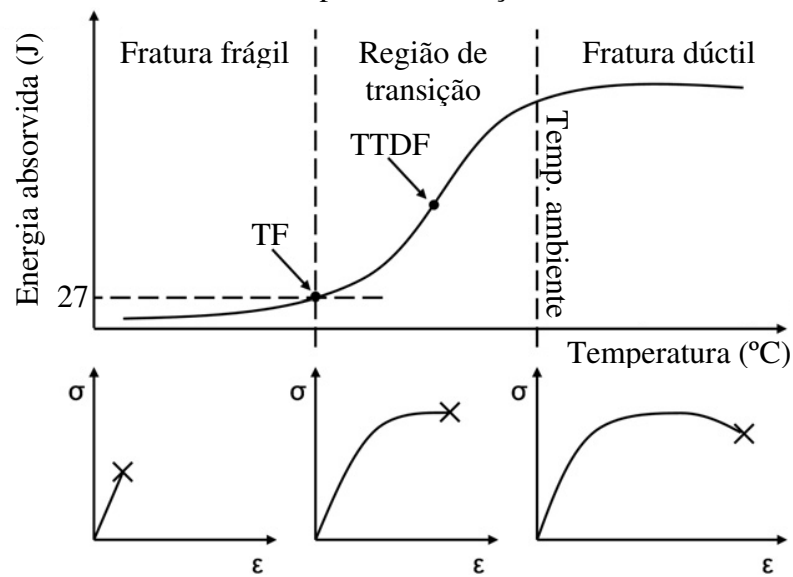


Fonte: Liebherr (2018)

A temperatura na qual se tem aproximadamente 50% de fratura frágil é denominada temperatura de transição dúctil/frágil (TTDF) e pode ser considerada como aquela que

corresponde à metade da energia absorvida na região de fratura dúctil. O início da região de fratura frágil ocorre abaixo da temperatura frágil (TF) que conforme normas internacionais para produtos de aço geralmente corresponde a energia de 34 J/cm², ou seja, 27 J para um corpo de prova padrão (SUN; PACKER, 2014). A típica curva energia absorvida-temperatura obtida no ensaio de impacto Charpy e a sua relação aproximada com o comportamento do aço quanto a sua forma de fratura é ilustrada na Figura 13.

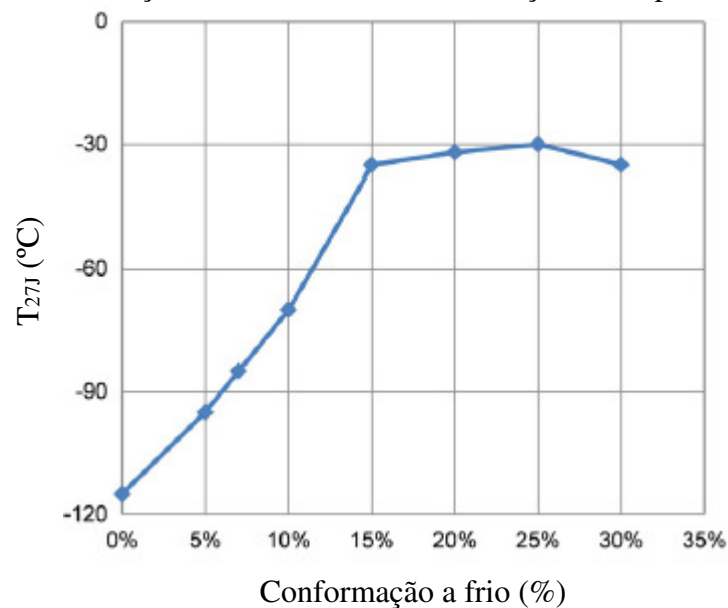
Figura 13 - Típica curva energia absorvida-temperatura e relação com a forma de fratura em componentes de aço



Fonte: Adaptado de Sedlacek et al. (2008)

O processo de conformação a frio afeta consideravelmente a TTDF. Quanto maior a porcentagem de deformação a frio maior será o risco de o material fraturar de forma frágil em baixas temperaturas. A relação é de 1:3 a 1:5, ou seja, para cada porcentagem de trabalho a frio, a TTDF irá aumentar de 3 a 5 °C, sendo que a partir de 15% a alteração passa a ser insignificante. A Figura 14 exhibe a alteração na temperatura para um corpo de prova padrão absorver uma energia de 27 J (T_{27J}) devido a conformação a frio.

Figura 14 - Alteração na T_{27J} devido a conformação a frio para o aço S355J2



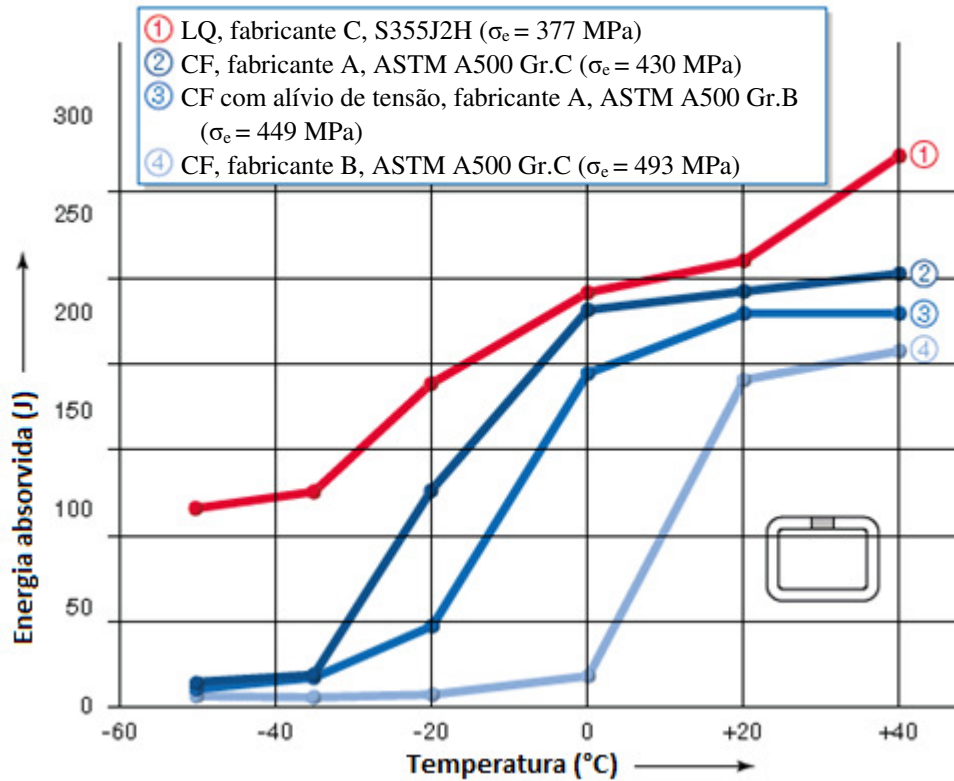
Fonte: Adaptado de VEREIN DEUTSCHER EISENHÜTTENLEUTE¹ (1992 apud SUN; PACKER, 2014, p. 118)

Nota: para o aço S355J2 a energia absorvida no ensaio de impacto Charpy deve ser de no mínimo 27 J a -20 °C

Como a porcentagem de trabalho a frio em um tubo CF situa-se em geral entre 20 e 30%, há uma significativa influência na TTDF conforme pode ser visto na Figura 15. Isto é inclusive descrito em uma nota na American Society for Testing and Materials-ASTM A500M (2018) que diz que os tubos produzidos de acordo com esta norma podem não ser adequados para aplicações onde a tenacidade a baixas temperaturas é importante.

¹ VEREIN DEUTSCHER EISENHÜTTENLEUTE. **Steel: a handbook for materials research and engineering, volume 1: fundamentals**. Düsseldorf: Springer Verlag, 1992 apud SUN, M.; PACKER, J. A. Charpy V-notch impact toughness of cold-formed rectangular hollow sections. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 97, p. 114-126, Mar. 2014.

Figura 15 - Variação da energia de impacto em função da temperatura para diferentes rotas de processamento e tipos de aço



Fonte: Adaptado de Kostascki, Packer e Puthli (2005)

Nota: a tensão de escoamento indicada corresponde ao valor reportado pelo fabricante do tubo

Porém, a tenacidade de um tubo CF pode ser melhorada com um tratamento térmico subsequente adequado para promover alterações metalúrgicas, deixando-o inclusive equivalente a um tubo LQ. Infelizmente, este não foi o caso do tubo CF com tratamento térmico testado por Kostascki, Packer e Puthli (2005), curva 3 da Figura 15, pois o modesto alívio de tensão realizado na temperatura de 496 °C por no mínimo 30 minutos seguido de resfriado ao ar não promoveu nenhuma melhoria na tenacidade do material.

Por outro lado, Kostascki, Packer e Puthli (2005) verificaram que a conformação a frio de seções tubulares quadradas e retangulares a partir de seções circulares laminadas a quente gera apenas uma pequena diminuição na tenacidade que por sua vez é mais pronunciada nos cantos, onde o encruamento do material é maior.

3.4 RESISTÊNCIA AO CARREGAMENTO ESTÁTICO

3.4.1 Resistência à tração

A resistência à tração de uma seção tubular depende da área da sua seção transversal e da tensão de escoamento do material.

Os raios de canto dos tubos quadrados e retangulares CF são limitados pelo processo de deformação a frio para que não ocorram trincas no material. Portanto, geralmente os tubos LQ possuem um raio de canto menor e conseqüentemente área transversal maior em comparação com os tubos CF de mesma dimensão nominal. Porém, esta redução de área é de certa forma compensada pela maior tensão de escoamento do tubo CF devido à deformação a frio.

Portanto, a princípio não há significativas diferenças na resistência à tração dos tubos produzidos por estes diferentes processos. Tipicamente o que ocorre é uma distribuição não uniforme das propriedades mecânicas na seção transversal dos tubos CF.

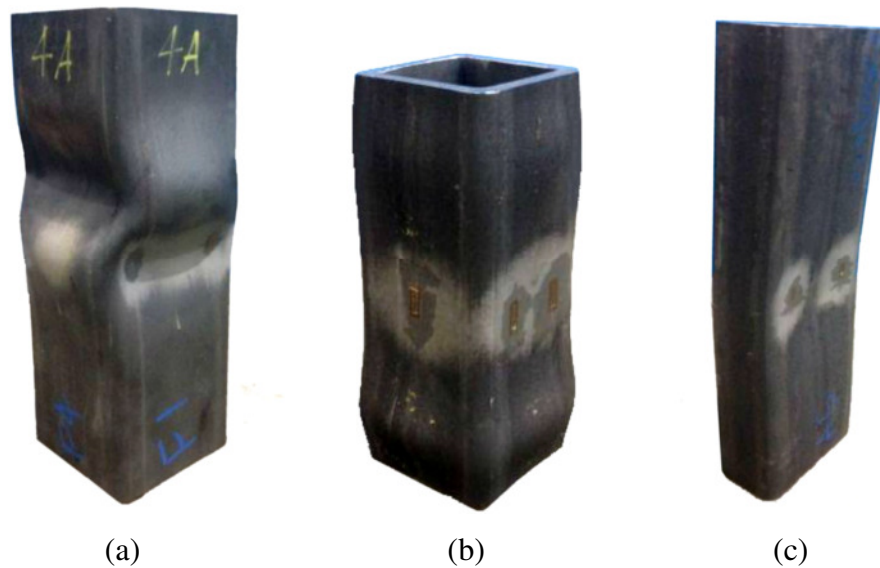
3.4.2 Resistência à compressão

Quanto a resistência à compressão, essa é dependente da esbeltez da peça (λ) que é a relação entre o comprimento de flambagem (l_f) e o raio de giração da seção transversal (r), equação 1.

$$\lambda = \frac{l_f}{r} \quad (1)$$

Quando um elemento estrutural é submetido a um carregamento axial de compressão e atinge uma determinada carga crítica, ele apresenta uma instabilidade lateral que pode ser localizada ou generalizada, Figura 16. Este tipo de falha é denominado falha por flambagem e por ser frequentemente súbita e catastrófica, a sua prevenção é muito importante.

Figura 16 - Típicos modos de falha por flambagem: (a) localizada;
(b) pé de elefante (localizada); (c) generalizada




Fonte: Wang et al. (2016)

Segundo Wardenier et al. (2010, p. 11) “O comportamento a flambagem é influenciado pelas excentricidades iniciais, retitude e tolerâncias geométricas assim como pelas tensões residuais, não homogeneidades do aço e relação tensão-deformação.”.

Resultados experimentais obtidos em um projeto de pesquisa patrocinado pelo *Comité International pour le Développement et l'Étude de la Construction Tubulaire* (CIDECT) confirmaram estas influências já que as cargas críticas de flambagem para uma mesma seção foram menores nos tubos CF. Isto foi refletido na sua inferior classificação nas curvas de flambagem do Eurocode 3, EN 1993-1-1 (2005), Tabela 2.

Tabela 2 - Seleção da curva de flambagem para seções tubulares

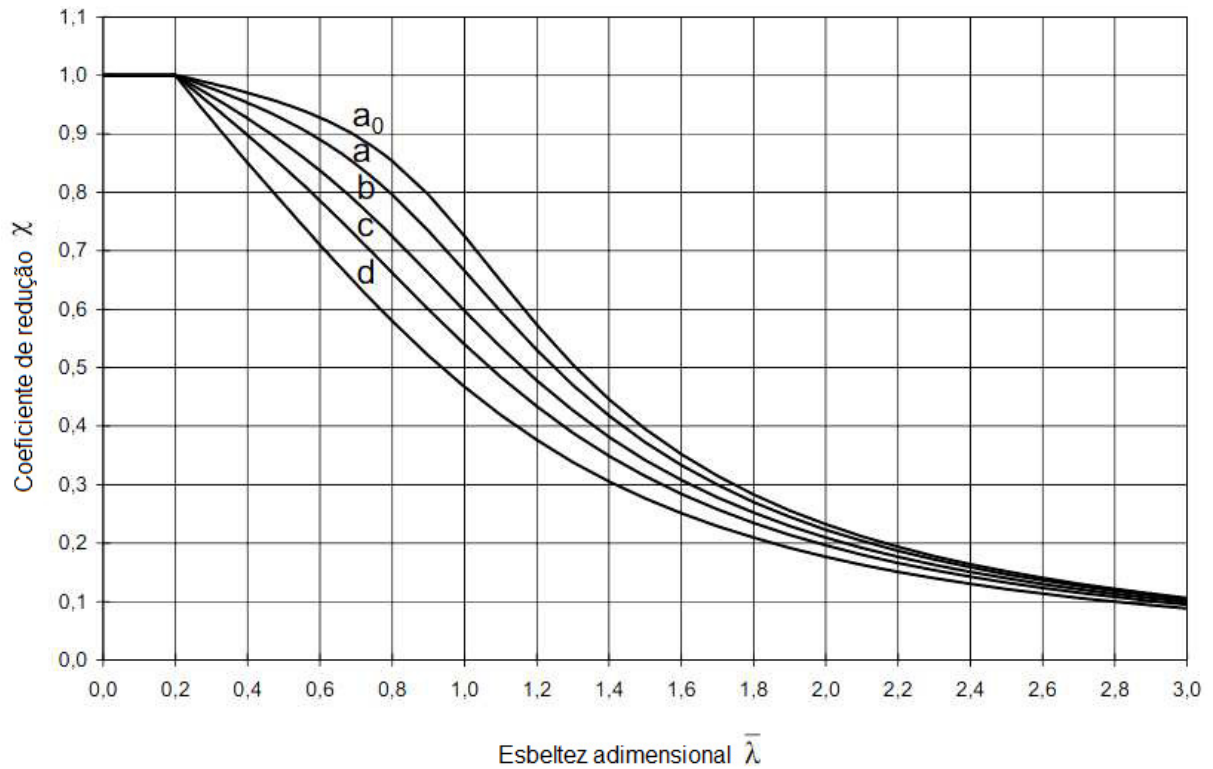
Perfil tubular	Processo de fabricação	Eixo de flambagem	Curva de flambagem	
			S235	S460
			a	a ₀
	Laminado a quente	qualquer	a	a ₀
	Conformado a frio	qualquer	c	c

Fonte: Adaptado da EN 1993-1-1 (2005)

Nota: as curvas de flambagem foram definidas para uma série de aços estruturais cuja tensão mínima de escoamento em MPa é indicada pelos três números após a letra S

Como pode ser visto na Figura 17, os valores da curva *a* chegam a ser 27% maiores que os da curva *c*. Na prática, isto se traduz na possibilidade de se dimensionar elementos estruturais com seções transversais menores utilizando os perfis LQ.

Figura 17 - Curvas europeias de flambagem



Fonte: EN 1993-1-1 (2005)

Nota 1: coeficiente de redução: $\chi = \sigma_{crf} / \sigma_e$

Nota 2: esbelteza adimensional: $\bar{\lambda} = \lambda / \lambda_E$, onde $\lambda_E = \pi \cdot \sqrt{E / \sigma_e}$

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAL UTILIZADO

Neste trabalho foram utilizados tubos de aço de seção quadrada de 80x80x10 mm produzidos a partir de seções circulares laminadas a quente e sem costura. A seção quadrada foi obtida por laminação a quente e também por conformação a frio com posterior tratamento térmico de alívio de tensão. Esse tratamento térmico foi realizado aquecendo o tubo até uma temperatura entre 560 e 630 °C por no mínimo 10 minutos seguido por resfriamento ao ar.

Os perfis LQ foram fabricados na Alemanha no aço S355J2H conforme a EN 10210-1 (2006) e os CF foram produzidos pelo mesmo fabricante, porém, no Brasil e no aço St 52 de acordo com a Deutsche norm-DIN 2391-2 (1994). Apesar das designações dos aços serem diferentes, eles possuem praticamente as mesmas propriedades mecânicas, como pode ser visto na Tabela 3 e na Tabela 4, e são classificados como aços carbono estruturais.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas do aço S355J2H

Limites	σ_e MPa	σ_{mrt} MPa	Alongamento %
Mín.	355	470	22
Máx.	-	630	-

Fonte: EN 10210-1 (2006)

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do aço St 52

Limites	σ_e MPa	σ_{mrt} MPa	Alongamento %
Mín.	355	490	22
Máx.	-	630	-

Fonte: DIN 2391-2 (1994)

As composições químicas destes aços de acordo com as respectivas normas são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição química dos aços S355J2H e St 52

Aço	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Al %	Cu %	Cr %	Ni %	Mo %	V %	Ti %	Nb %	N %	CE %
S355J2H	≤0,22	≤0,55	≤1,60	≤0,03	≤0,03	≥0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	≤0,45
St 52	≤0,22	≤0,55	≤1,60	≤0,025	≤0,025	-	-	-	-	-	≤0,05	≤0,03	≤0,03	-	-

Fonte: EN 10210-1 (2006) e DIN 2391-2 (1994)

Na Figura 18 é possível visualizar o tubo LQ a direita e o CF a esquerda após serem cortados na serra radial em barras de 1 m para facilitar o transporte.

Figura 18 - Tubos utilizados na pesquisa com dimensão nominal de 80x80x10 mm



Fonte: Autor

4.2 METODOLOGIA UTILIZADA

A partir dos tubos descritos no item 4.1, foram confeccionados corpos de prova (CPs) para a realização de análises metalográficas e dos ensaios de dureza por microindentação, de impacto Charpy, de tração e de compressão. Para efeito deste estudo, todos os ensaios foram realizados rigorosamente nas mesmas condições e posições para as amostras retiradas do tubo quadrado laminado a quente e do conformado a frio.

A preparação dos CPs foi realizada na Oficina de Apoio à Pesquisa do DMT/FEG/UNESP e os ensaios foram realizados nos laboratórios do DMT/FEG/UNESP com exceção do ensaio de compressão que foi realizado na Divisão de Tecnologia de Engenharia Civil de FURNAS Centrais Elétricas S.A..

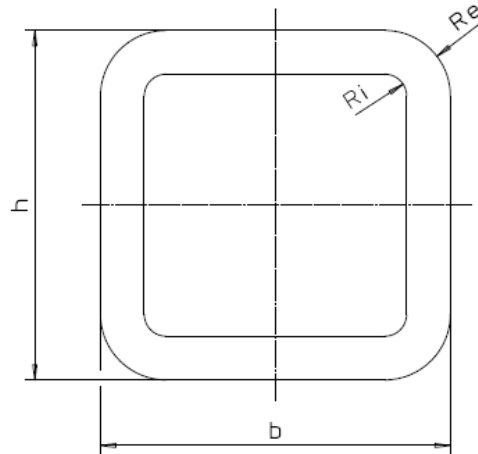
4.2.1 Análise dimensional

Uma análise dimensional das seções transversais das amostras LQ e CF foi realizada com o objetivo de se comparar os resultados entre si e com as tolerâncias dimensionais das respectivas normas, ou seja, EN 10210-2 (2006) e ASTM A500M (2018). As medições lineares foram realizadas utilizando-se um paquímetro digital da marca Mitutoyo, modelo

ABSOLUTE, e os raios foram medidos com calibres de raio da marca Mitutoyo, modelos 186-107 e 186-106.

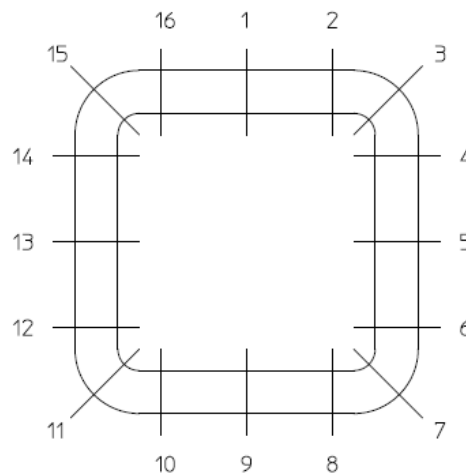
Foram medidos os valores de altura, largura e dos raios externos e internos dos quatro cantos, respectivamente, h , b , R_e e R_i conforme Figura 19. A espessura da parede foi medida em 16 pontos conforme Figura 20.

Figura 19 - Identificação das medidas geométricas realizadas nas amostras



Fonte: Autor

Figura 20 - Identificação dos 16 pontos de medição da espessura das amostras



Fonte: Adaptado de Packer e Sun (2013)

4.2.2 Análise da composição química

A composição química dos tubos foi analisada com base nos valores apresentados nos certificados dos fabricantes e o carbono equivalente (CE) foi calculado pela equação (2) como

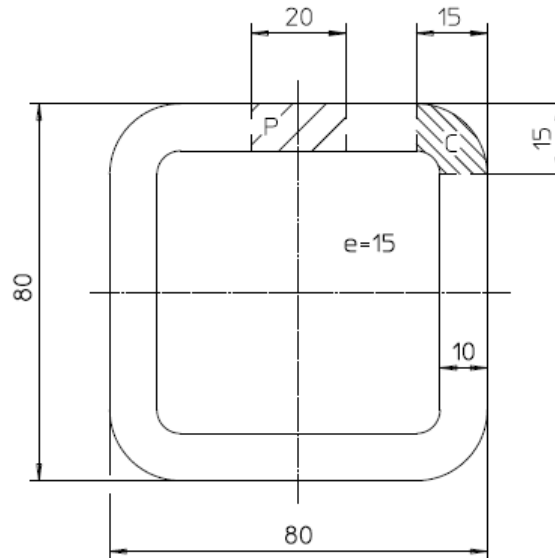
recomendado pela EN 10210-1 (2006) e pelo Instituto Internacional de Soldagem, IIW na sigla em inglês.

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (2)$$

4.2.3 Análise metalográfica

Para o ensaio de metalografia foram retiradas duas amostras de cada tubo por eletroerosão, uma da região plana e outra do canto, representadas respectivamente pelas letras P e C na Figura 21. O principal objetivo deste ensaio foi comparar a microestrutura da face transversal das diferentes amostras.

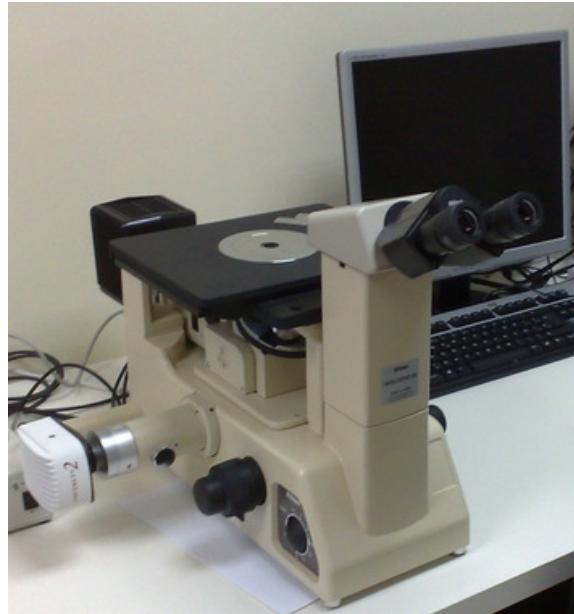
Figura 21 - Amostras dos ensaios de metalografia



Fonte: Autor

Para obtenção das imagens utilizou-se o microscópio óptico da marca Nikon e modelo EIPHOT 200 do Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG/UNESP, Figura 22.

Figura 22 - Microscópio óptico Nikon EPIPHOT 200



Fonte: Autor

4.2.3.1 Preparação metalográfica

Inicialmente as amostras foram embutidas a quente em baquelite utilizando a embutidora da marca Arotec modelo Pre 30Mi que realizou um ciclo de aquecimento até 150 °C na pressão entre 100 e 125 kgf/cm² por cerca de 10 minutos, seguido de um resfriamento por mais três minutos.

Em seguida, as amostras foram lixadas manualmente com lixas d'água na seguinte sequência granulométrica: 100, 220, 320, 400, 600, 1200 e 1500. O tempo de lixamento foi de cerca de dois minutos em cada lixa.

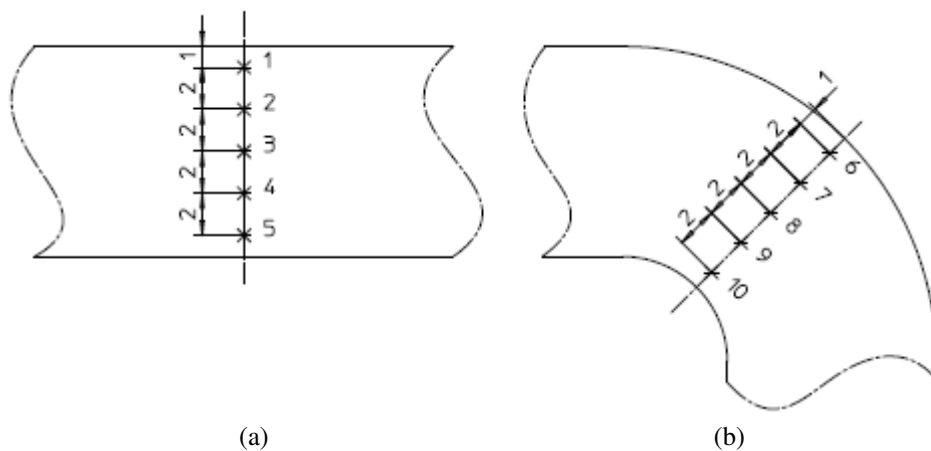
Após o lixamento, as superfícies das amostras foram lavadas com água e secadas com secador de ar quente para a operação de polimento que foi realizada na politriz automática da marca Struers, modelo DP-10, por cerca de três minutos. Utilizou-se para o polimento a sílica coloidal OP-U com granulação de 0,25 µm em pano OP-NAP da Struers umedecido com água destilada. Finalizando esta etapa as amostras foram enxaguadas com água, limpas com álcool etílico e secadas rapidamente com secador de ar quente.

Por fim, realizou-se o ataque químico com o reagente Nital 2% (2% de ácido nítrico diluído em 98% de álcool etílico) por um minuto. Após este período, o ataque foi interrompido e a amostra foi colocada sob água corrente.

4.2.4 Ensaio de dureza por microindentação

Um mapeamento do perfil de dureza das seções transversais dos tubos LQ e CF foi realizado com o objetivo de se avaliar a variação da dureza ao longo do perímetro das amostras devido aos diferentes processos de fabricação. Além disto, realizou-se também a medição da dureza em diferentes pontos da espessura das amostras, na face plana e nos cantos, conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 23 - Pontos de medição da dureza na espessura dos tubos: (a) face plana; (b) canto



Fonte: Autor

Utilizou-se neste ensaio o microdurômetro da marca Wilson, modelo 401 MVD, do Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG/UNESP, Figura 24, configurado para realizar a medição da dureza por microindentação Vickers conforme ASTM E384 (2017). Cada uma das 38 medidas ao longo do perímetro de cada amostra foi efetuada com uma carga de 0,100 kgf por 15 s. Esta mesma carga foi utilizada na medição da dureza na espessura da face plana porém, no canto, a carga foi de 0,500 kgf por 15 s.

Figura 24 - Microdurômetro Wilson 401 MVD



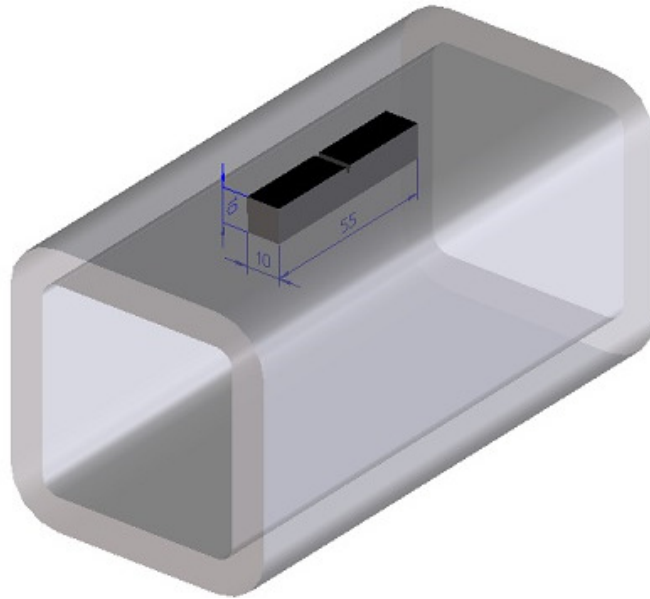
Fonte: Autor

Na preparação para o ensaio as superfícies das amostras foram lixadas com lixas d'água de granulometrias 100, 220, 320, 400 e 600 e em seguida, foram polidas com sílica coloidal OP-U.

4.2.5 Ensaio de impacto Charpy

A fim de avaliar a tenacidade ao entalhe, principalmente a baixas temperaturas, CPs padrão de 10x10x55 mm com entalhe em V de acordo com a norma ASTM E23 (2016) foram retirados dos tubos LQ e CF na direção longitudinal, ou seja, no mesmo sentido da laminação. O entalhe foi realizado na face externa conforme pode ser visto na Figura 25. Escolheu-se esta orientação do CP pois é a que resulta em maiores valores de energia absorvida como demonstrado por Zhang et al. (2016), além de ser a posição definida pelo fabricante para a certificação do material.

Figura 25 - Orientação do CP para o ensaio de impacto em relação ao tubo



Fonte: Autor

Foram ensaiados três CPs de cada tubo nas temperaturas de $-74\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-46\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $21\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para atingir as temperaturas abaixo de $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ utilizou-se uma caixa térmica com a mistura de álcool etílico e CO_2 (quanto mais baixa a temperatura desejada, maior foi a concentração de CO_2 na mistura). Para as demais temperaturas, utilizou-se respectivamente: caixa térmica com mistura de gelo e NaCl , caixa térmica com gelo e o ambiente do laboratório.

Conforme recomendação da ASTM E23 (2016), as amostras foram mantidas no meio especificado para homogeneização da sua temperatura por no mínimo 5 minutos no meio líquido e 30 minutos nos meios gasosos. O tempo de retirada das mesmas e o ensaio foi inferior a 5 s.

O equipamento do Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG/UNESP utilizado foi o Mohr&Federhaff AG, modelo PSW 30/15, com pêndulo de 20 Kg e raio de 770 mm, Figura 26.

Figura 26 - Equipamento para ensaio de impacto Mohr&Federhaff AG PSW 30/15

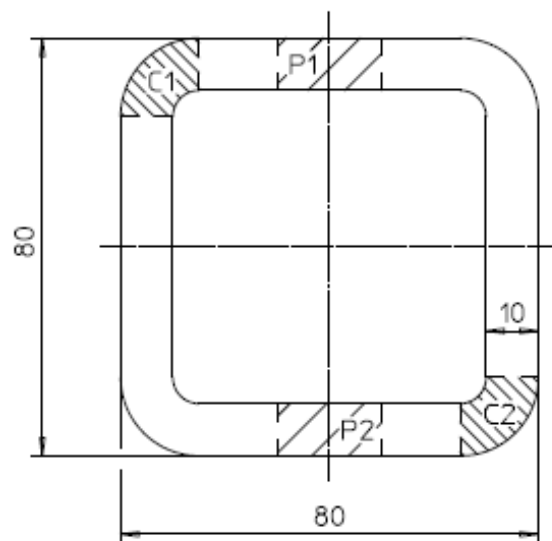


Fonte: Autor

4.2.6 Ensaio de tração

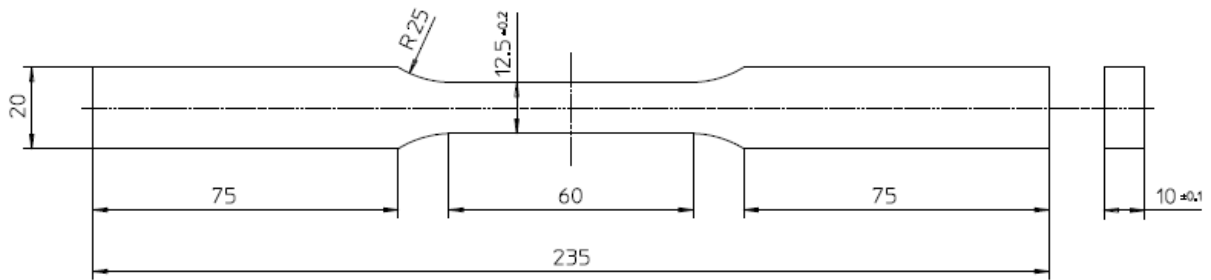
Para o ensaio de tração foram retirados quatro CPs de cada tubo na direção longitudinal, dois das faces planas e dois dos cantos conforme Figura 27 e Figura 28.

Figura 27 - Localização dos CPs para o ensaio de tração e as siglas adotadas



Fonte: Autor

Figura 28 - CP utilizado no ensaio de tração (medidas em mm)



Fonte: Adaptado da ASTM E8M (2016)

Os CPs de canto tiveram as suas extremidades planificadas através de fresamento para permitir a sua fixação nas garras do equipamento. Na Figura 29 pode ser visualizado um CP da face plana e um do canto do tubo LQ e do tubo CF respectivamente.

Figura 29 - CPs de tração antes do ensaio



Fonte: Autor

Devido à resistência à tração do material e a fim de ensaiá-lo na sua espessura nominal, utilizou-se um equipamento da marca Instron modelo 8801 com capacidade de 100 kN do Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG/UNESP, Figura 30. O ensaio foi realizado na temperatura ambiente de 24 °C e de acordo com a norma ASTM E8M (2016).

A tensão de escoamento foi determinada como sendo a primeira tensão máxima verificada durante a fase de escoamento do material. Quando o fenômeno do escoamento não se apresentou nítido, considerou-se a tensão gerada por uma deformação permanente de 0,2%.

Figura 30 - Equipamento servo-hidráulico de ensaios mecânicos Instron 8801



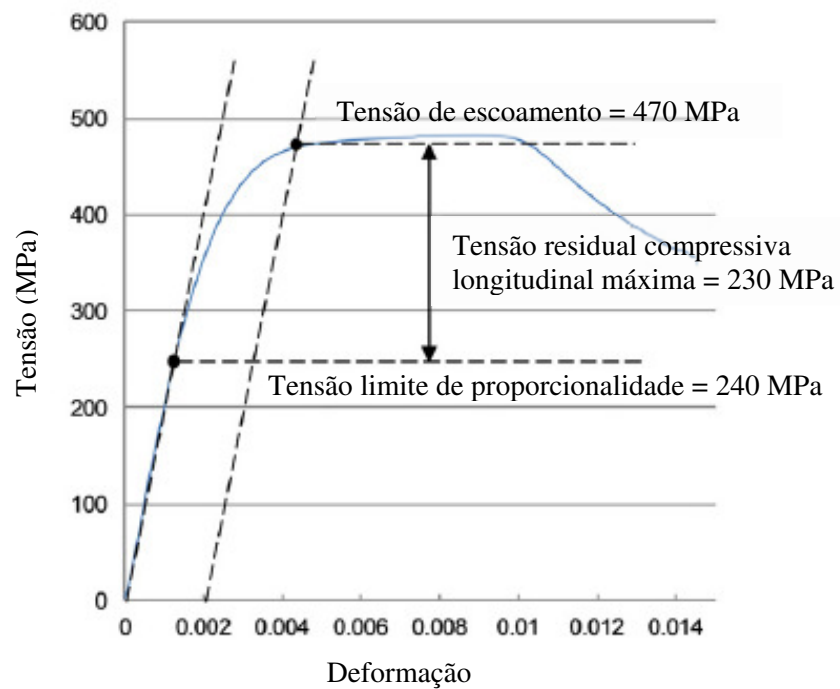
Fonte: Autor

4.2.7 Ensaio de compressão

O ensaio de compressão axial pura foi realizado tendo como referência a norma ASTM E9 (2009) e a literatura existente sobre trabalhos similares. O principal objetivo deste ensaio foi determinar a força de compressão máxima admissível e, adicionalmente, obter a curva tensão-deformação dos tubos.

Através da curva tensão-deformação foi estimada a tensão residual compressiva longitudinal máxima pelo método descrito por Packer e Sun (2013), ou seja, pela diferença entre a tensão de escoamento e a tensão limite de proporcionalidade (fronteira entre a deformação elástica e plástica), Figura 31.

Figura 31 - Exemplo para se determinar a tensão residual compressiva longitudinal máxima baseado no resultado do ensaio de compressão



Fonte: Packer e Sun (2013)

Foram preparadas duas amostras do tubo LQ e duas do tubo CF com um comprimento que pudesse manter a influência das tensões residuais e das imperfeições geométricas devido aos processos de fabricação dos tubos, porém, que não fosse longo demasiadamente para segurança do ensaio. Desta forma, as amostras foram cuidadosamente cortadas com 800 mm de comprimento em um centro de usinagem por eletroerosão para que suas extremidades ficassem planas, paralelas e perpendiculares ao eixo axial do tubo conforme requerido pela norma ASTM E9 (2009).

Devido à resistência à compressão teórica dos tubos e à recomendação da norma de que o equipamento de ensaio deve ser configurado para trabalhar em um range de carga de no mínimo três vezes a carga máxima prevista, utilizou-se a prensa hidráulica da marca MARUTO modelo PHC500B-601 com capacidade de 5.000 kN da Divisão de Tecnologia de Engenharia Civil de FURNAS Centrais Elétricas S.A., Figura 32.

Figura 32 - Prensa MARUTO utilizada no ensaio de compressão



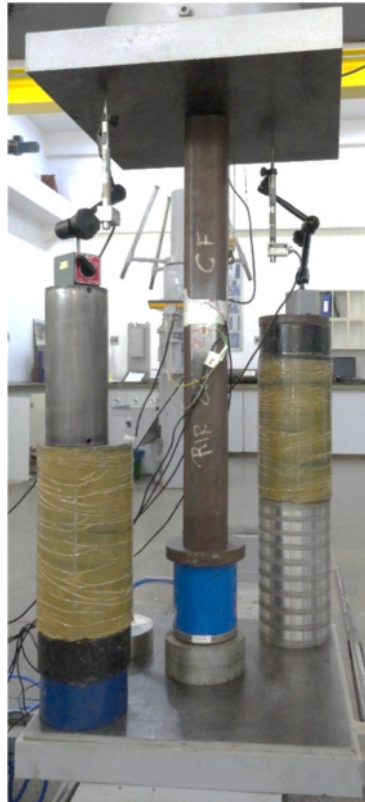
Fonte: Autor

Como preparação para o ensaio, mediu-se o comprimento real das amostras e pesou-as. Em seguida, foi calculada a área real da seção transversal através da massa específica do aço, 7.850 kg/m^3 (ASM INTERNATIONAL, 1990). Esta área foi então utilizada para o cálculo da tensão aplicada nos CPs.

Em cada amostra foram instalados quatro *strain gages* longitudinalmente, um em cada face plana do tubo e centralizados. Depois, foi providenciada a limpeza das extremidades das amostras e das placas de apoio da prensa com solvente para a remoção de resíduos de graxa e óleo. Logo após, foi feito o posicionamento cuidadoso da primeira amostra no equipamento para se obter um carregamento concêntrico. A amostra ficou sobre uma célula de carga calibrada com capacidade de 2.000 kN.

Por fim, foram instalados dois medidores de deslocamento, *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT), para medir o deslocamento axial da prensa. Na Figura 33 pode ser visto o arranjo geral para o ensaio.

Figura 33 - Arranjo geral para o ensaio de compressão



Fonte: Autor

Foi então realizado um pré-teste na região elástica do material para se verificar as leituras dos *strain gages*. A posição do tubo em relação ao equipamento foi considerada ideal quando estas leituras diferiram de no máximo 5% da deformação média. Assim, foi garantido o carregamento concêntrico (GARDNER; SAARI; WANG, 2010).

O ensaio foi finalmente iniciado com um carregamento *quasi-estático* a fim de evitar qualquer influência dinâmica nos resultados (PACKER; SUN, 2013). A taxa de carregamento seguiu o experimento bem-sucedido de Zhu et al. (2016), ou seja, foi de 200 kN a cada 3 min até atingir 600 kN, passando em seguida para 100 kN a cada 3 min até a carga máxima.

A taxa de aquisição de dados ocorreu com uma frequência de 10 Hz, ou seja, a cada 0,1 s, usando o software Catman Easy da HBM.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ANÁLISE DIMENSIONAL

Na Tabela 6 são mostrados os valores medidos da altura, da largura e dos raios da seção transversal dos tubos e também as tolerâncias de acordo com as respectivas normas. Os números 3, 7, 11 e 15 representam os cantos de medição dos raios conforme Figura 20.

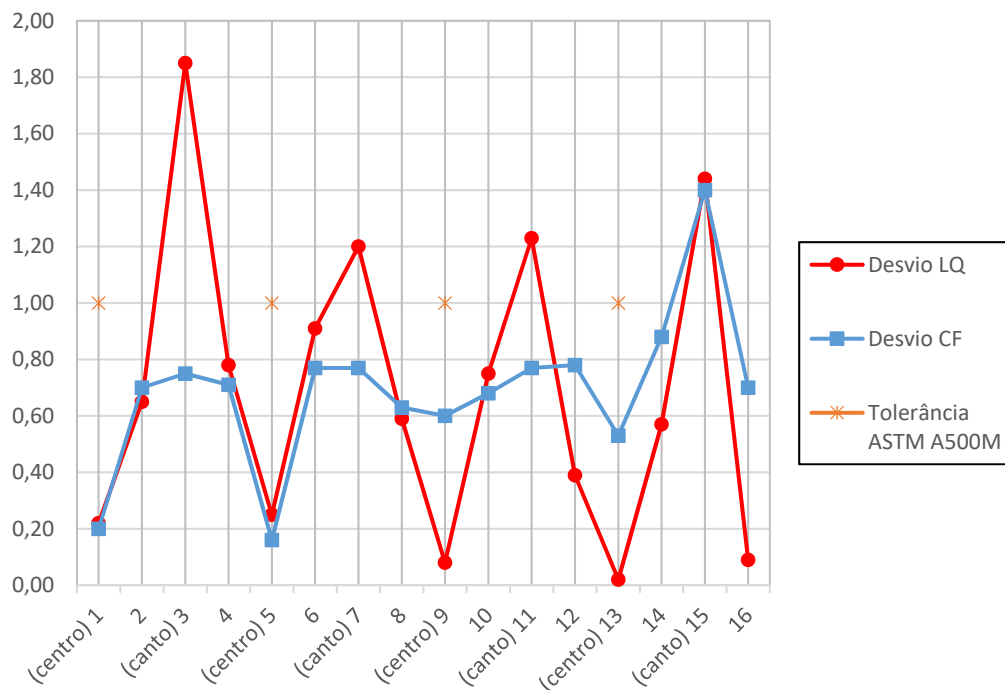
Tabela 6 - Dimensões da seção transversal dos tubos e respectivas tolerâncias

Amostra Norma	h mm	b mm	Re mm				Ri mm			
			3	7	11	15	3	7	11	15
Tubo LQ EN 10210-2	79,20 80±0,8	79,34 80±0,8	18,0	18,0	18,0	18,0	5,5	4,5	4,5	4,5
Tubo CF ASTM A500M	79,78 80±0,6	79,98 80±0,6	22,0	22,0	22,0	22,0	7,5	7,5	7,5	10

Fonte: Autor

O desvio da espessura da parede em relação ao valor nominal de 10 mm para os 16 pontos conforme Figura 20 foram plotados em um gráfico como pode ser visto na Figura 34.

Figura 34 - Desvio da espessura em relação ao valor nominal (valores em mm)



Fonte: Autor

Segundo a EN 10210-2 (2006), o desvio positivo na espessura é limitado pela tolerância de massa, já a ASTM A500/A500M (2018) especifica este valor em 10% da espessura nominal. Porém, este requisito se aplica somente ao centro das faces planas. Portanto, analisando todos os valores medidos, pode-se afirmar que ambos os tubos estão de acordo com as tolerâncias dimensionais.

Em relação aos raios de canto, é interessante notar a uniformidade dos valores medidos nos diferentes pontos e a significativa diferença entre as amostras das seções LQ e as CF (ZHANG et al., 2016). Como era esperado devido aos distintos processos de fabricação, o tubo CF apresentou um raio externo 22% maior que o tubo LQ. Todavia, neste caso, isto resultou em uma diminuição da área da seção transversal de apenas 2,7%.

5.2 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Os elementos químicos presentes nas amostras e os limites especificados pelas normas foram compilados na Tabela 7. Na última coluna foi calculado o CE.

Tabela 7 - Composição química dos tubos LQ e CF

Amostra Norma	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Al %	Cu %	Cr %	Ni %	Mo %	V %	Ti %	Nb %	N %	CE %
Tubo LQ	0,120	0,238	1,440	0,013	0,001	0,036	0,025	0,071	0,026	0,000	0,059	0,003	0,032	0,011	0,39
EN 10210-1	≤0,22	≤0,55	≤1,60	≤0,03	≤0,03	≥0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	≤0,45
Tubo CF	0,180	0,240	1,480	0,013	0,014	0,017	0,010	0,170	0,030	0,020	0,006	0,001	0,001	-	0,47
DIN 2391-2	≤0,22	≤0,55	≤1,60	≤0,025	≤0,025	-	-	-	-	-	≤0,05	≤0,03	≤0,03	-	-

Fonte: Autor

Pode-se observar na Tabela 7 que ambos os tubos atendem as especificações das respectivas normas e as suas composições químicas são similares. Porém, o CE do tubo CF é 0,08% maior que o do tubo LQ, resultado da maior concentração de carbono e de cromo.

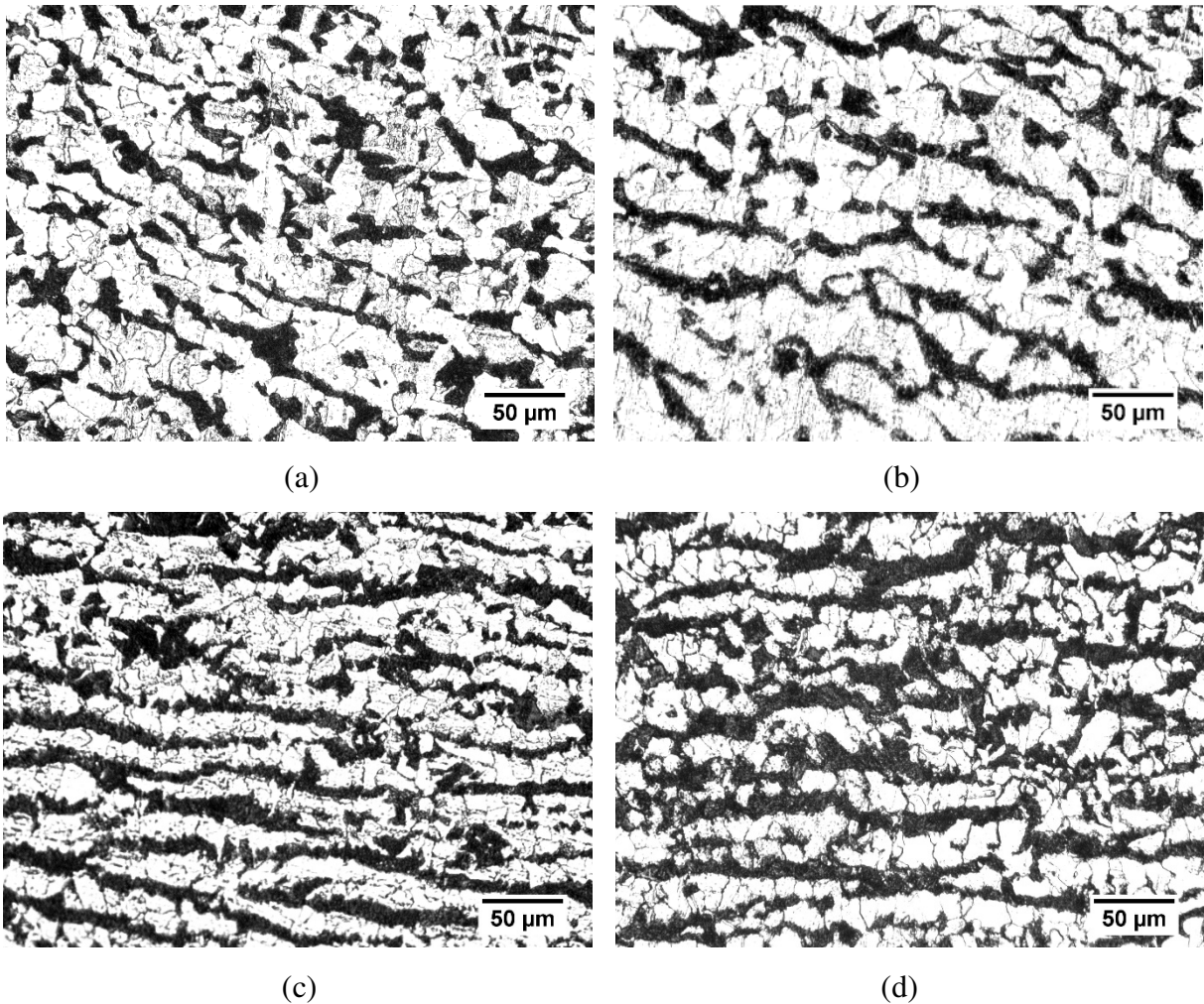
Embora não especificado pela DIN 2391-2 (1994), o CE de 0,47% do tubo CF é um indicador de que o aço é susceptível a apresentar trincas a frio devido a contaminação pelo hidrogênio durante a soldagem e, portanto, um pré-aquecimento do material é geralmente recomendado (ASM INTERNATIONAL, 1990).

5.3 ANÁLISE METALOGRAFICA

Após o ataque químico das amostras com o reagente Nital 2%, foi possível delinear os contornos de grãos com a visualização de duas tonalidades, uma mais clara e outra mais escura. A fase mais clara corresponde a ferrita enquanto a mais escura corresponde a perlita (VOORT, 2004).

É possível observar estes dois microconstituintes na Figura 35, onde nota-se também a perlita orientada e achatada devido ao processo de laminação.

Figura 35 - Microestruturas das amostras: (a) LQ-P; (b) LQ-C; (c) CF-P; (d) CF-C
(ampliação de 200X)

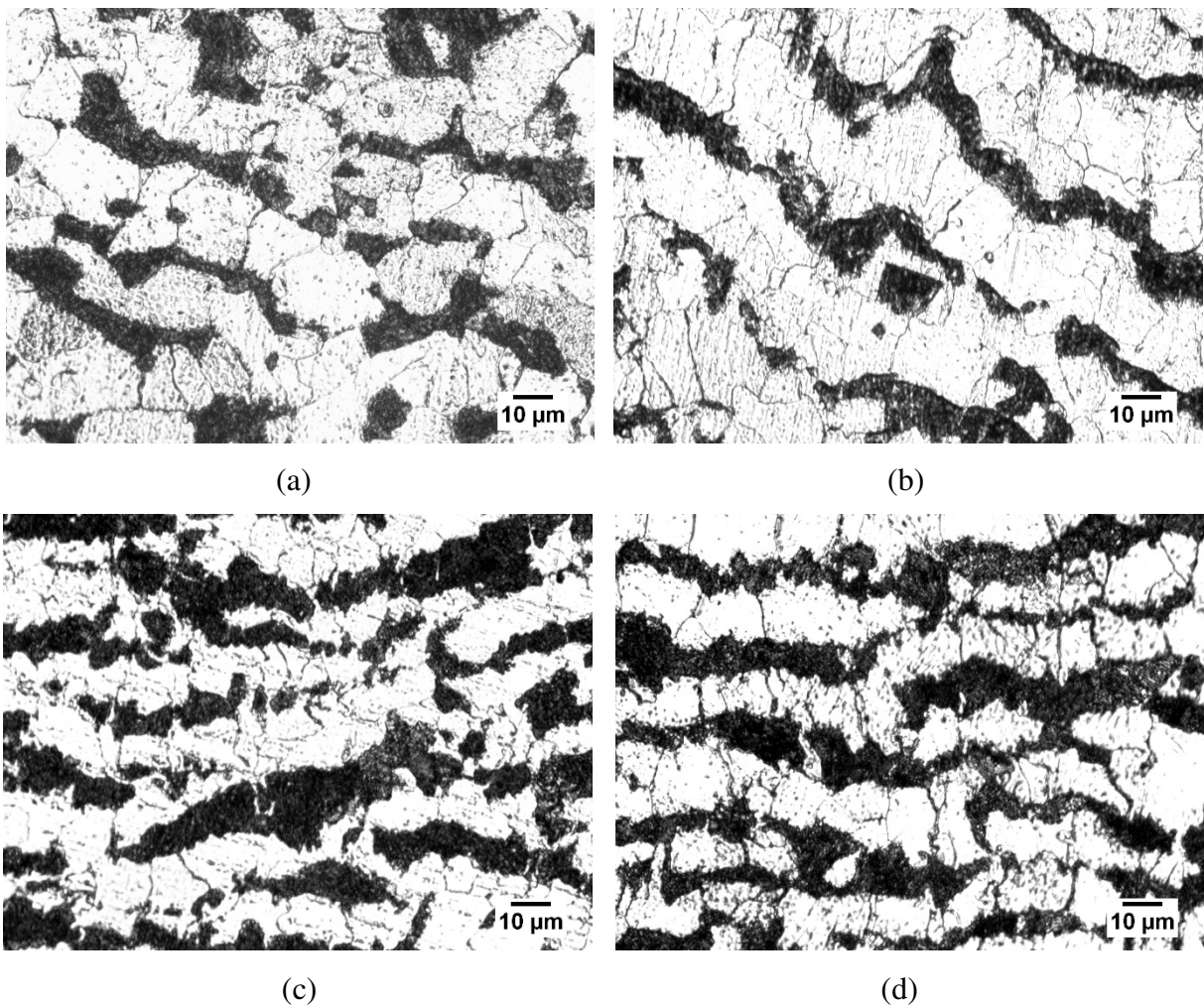


Fonte: Autor

Com uma ampliação maior na Figura 36 não foram observadas variações significativas na microestrutura das amostras das faces planas e dos cantos da mesma seção transversal, independentemente da região analisada, ou seja, verificou-se uma estrutura similar nas bordas e no centro das amostras.

Entre os tubos, os grãos de ferrita se apresentaram maiores e menos deformados no LQ, sendo a perlita maior no CF devido ao seu maior teor de carbono.

Figura 36 - Microestruturas das amostras: (a) LQ-P; (b) LQ-C; (c) CF-P; (d) CF-C
(ampliação de 500X)



Fonte: Autor

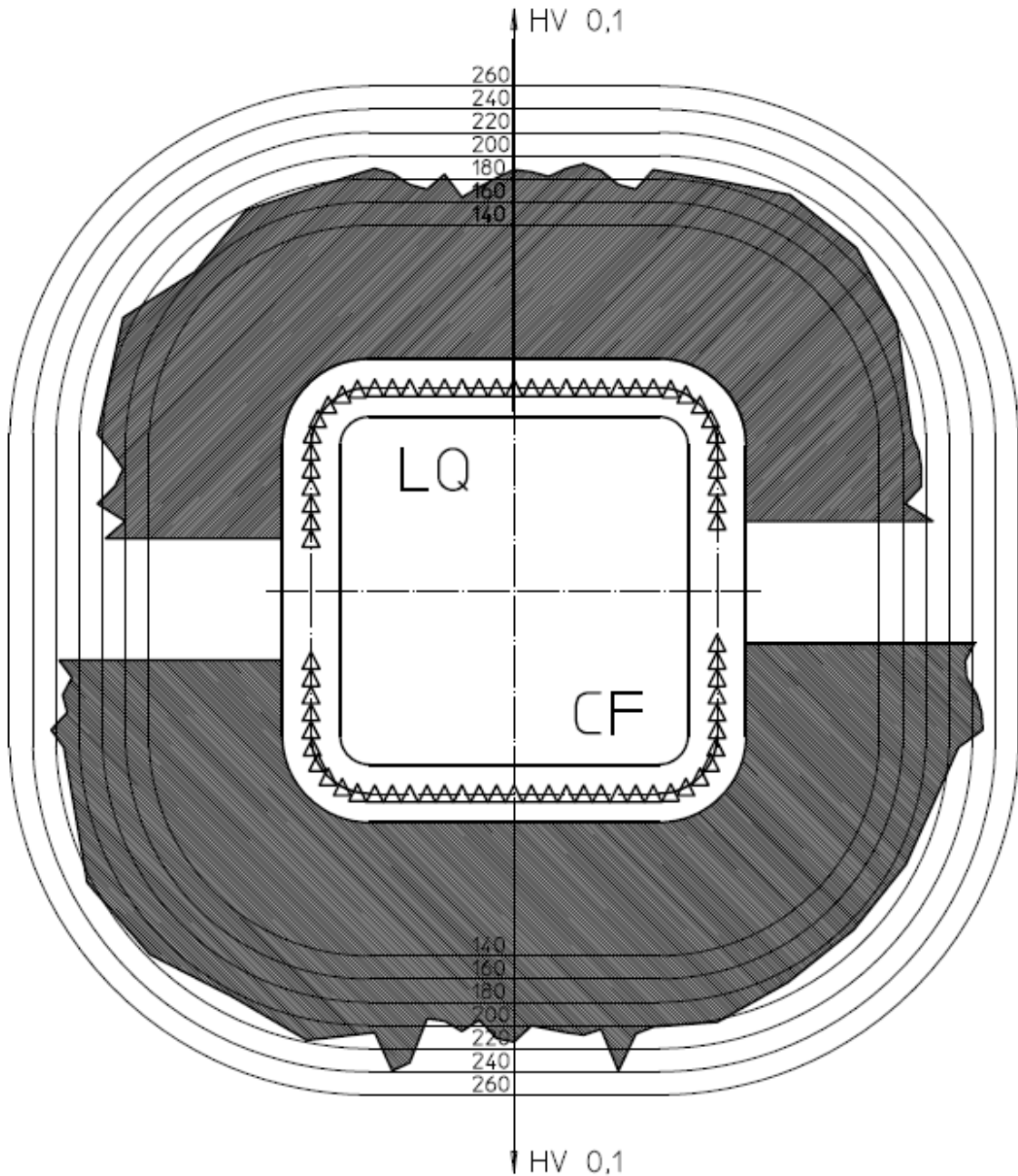
5.4 ENSAIO DE DUREZA POR MICROINDENTAÇÃO

A distribuição da dureza através da seção transversal das amostras pode ser visualizada na Figura 37. Nota-se uma maior uniformidade nos valores encontrados no tubo LQ, o que refletiu no menor desvio padrão, 9,4 versus 13,0 do tubo CF.

Os maiores valores de dureza do tubo CF foram obtidos na seção da face plana e os cantos individualmente apresentaram uma excelente homogeneidade.

A dureza média foi de 179 e 211 HV 0,1 para os tubos LQ e CF respectivamente, o que pode ser atribuído a maior concentração de carbono na composição da amostra CF e ao encruamento do metal proveniente do trabalho a frio.

Figura 37 - Distribuição da dureza através da seção transversal dos tubos

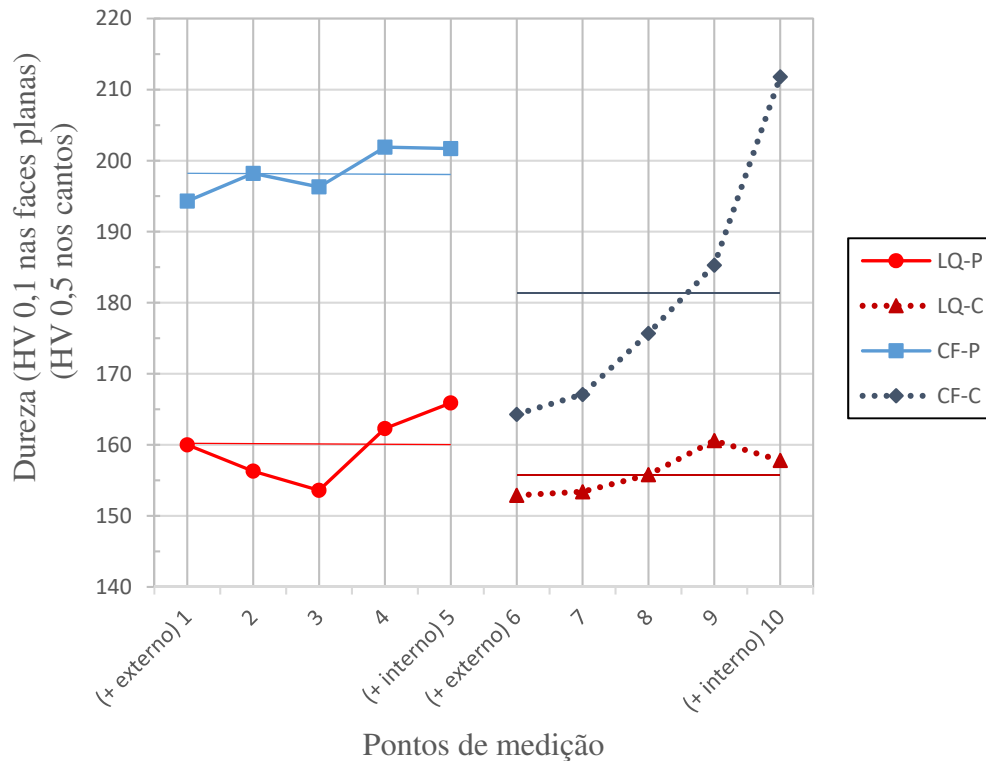


Fonte: Autor

Os valores de dureza encontrados nas medições realizadas ao longo da espessura foram plotados em um gráfico conforme Figura 38. Neste caso, o desvio padrão foi igual a 4,8 e 3,3

para as amostras retiradas da face plana do tubo LQ e CF respectivamente. Já para as amostras retiradas dos cantos, o desvio padrão foi de 3,2 e 19,2. Essa elevada dispersão nos valores encontrados nos cantos do tubo CF é resultado da variação da deformação a frio nesta região que aumenta de intensidade do Re para o Ri.

Figura 38 - Dureza em diferentes pontos da espessura das amostras



Fonte: Autor

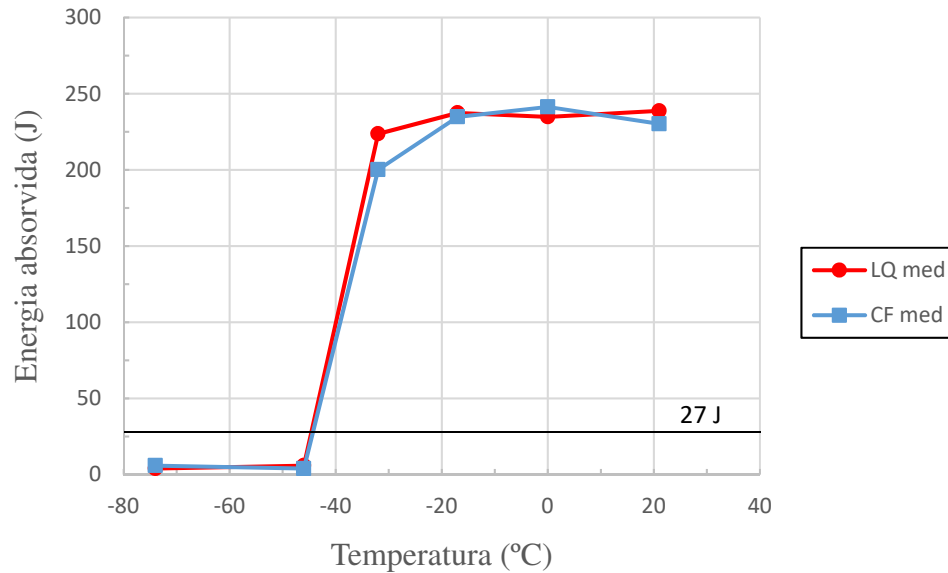
5.5 ENSAIO DE IMPACTO CHARPY

A média das energias absorvidas das amostras dos tubos LQ e CF nas diferentes temperaturas foram plotadas em um gráfico conforme pode ser visto na Figura 39. Em geral, os resultados de ambos os tubos foram similares e bem acima do requisito mínimo de 27 J a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ de acordo com a EN 10210-1 (2006). Houve apenas uma redução de 24 J na energia absorvida pelo tubo CF na temperatura de $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$. A separação dos CPs em duas partes após o impacto só ocorreu nas temperaturas de $-46\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-74\text{ }^{\circ}\text{C}$ para os dois tubos.

Os excelentes resultados obtidos pelas amostras do tubo CF neste estudo podem ser atribuídos ao processo de fabricação utilizado que tornou a seção CF equivalente a LQ. De fato, tanto o tubo LQ quanto o CF apresentaram uma região de transição dúctil-frágil entre as

temperaturas de $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-46\text{ }^{\circ}\text{C}$, o que foi evidenciado também pela mudança no aspecto da fratura.

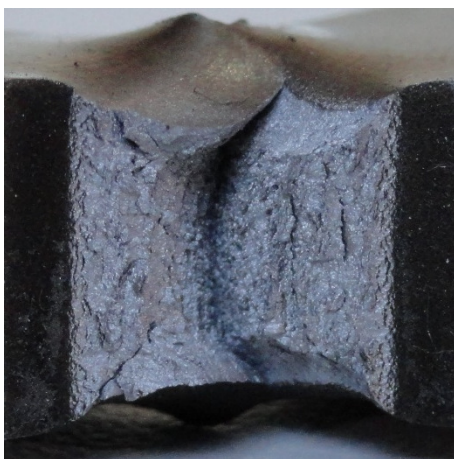
Figura 39 - Energia absorvida em função da temperatura para os diferentes tubos



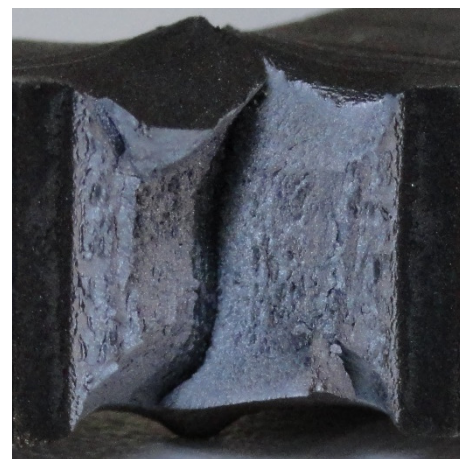
Fonte: Autor

A Figura 40 exibe as macrografias das fraturas das amostras em diferentes temperaturas. Não houve significativas variações no aspecto das fraturas entre os tubos e foi possível observar o aumento das delaminações com a diminuição da temperatura até a fratura frágil a partir de $-46\text{ }^{\circ}\text{C}$ (devido à similaridade, apenas a fratura a $-74\text{ }^{\circ}\text{C}$ foi exibida na Figura 40).

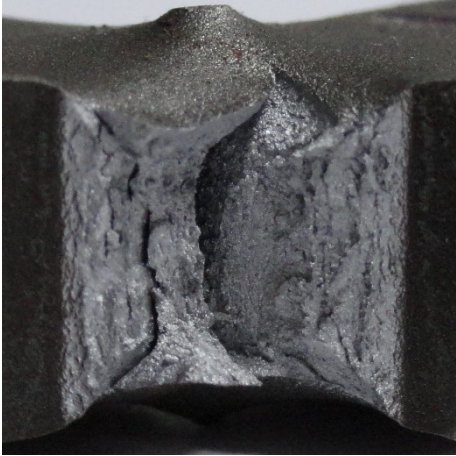
Figura 40 - Aspecto das fraturas das amostras: (a) LQ a $21\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) CF a $21\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) LQ a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) CF a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; (e) LQ a $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$; (f) CF a $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$; (g) LQ a $-74\text{ }^{\circ}\text{C}$; (h) CF a $-74\text{ }^{\circ}\text{C}$



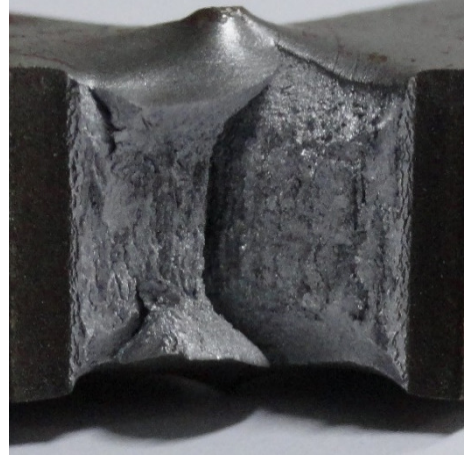
(a)



(b)



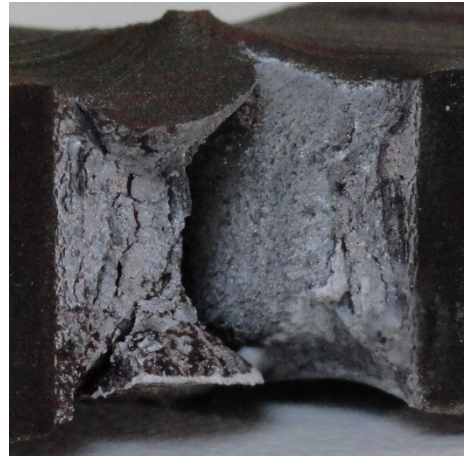
(c)



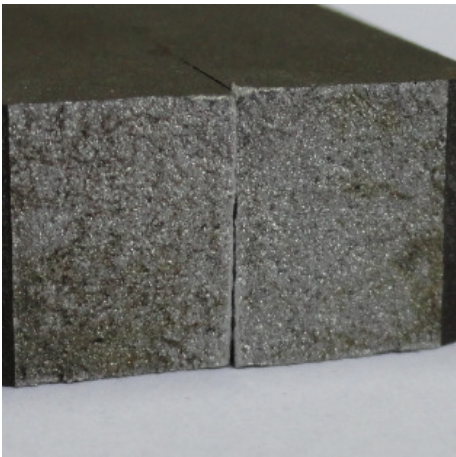
(d)



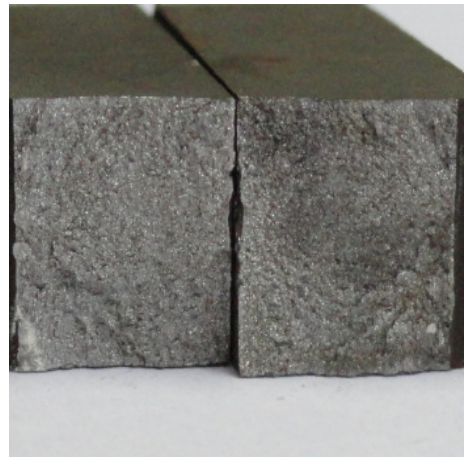
(e)



(f)



(g)



(h)

Fonte: Autor

5.6 ENSAIO DE TRAÇÃO

Na Figura 41 podem ser visualizados alguns CPs após a ruptura no ensaio de tração. Os dois primeiros foram retirados do tubo LQ enquanto os dois últimos do tubo CF. Nota-se claramente na imagem que as amostras retiradas do tubo LQ sofreram um maior alongamento total.

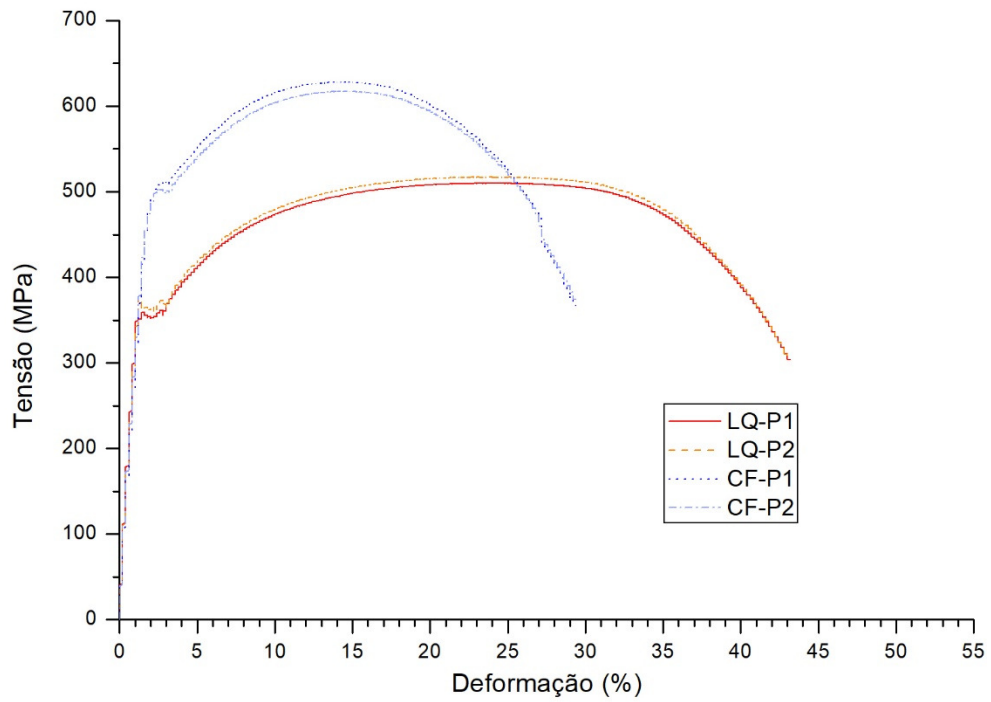
Figura 41 - CPs de tração após o ensaio



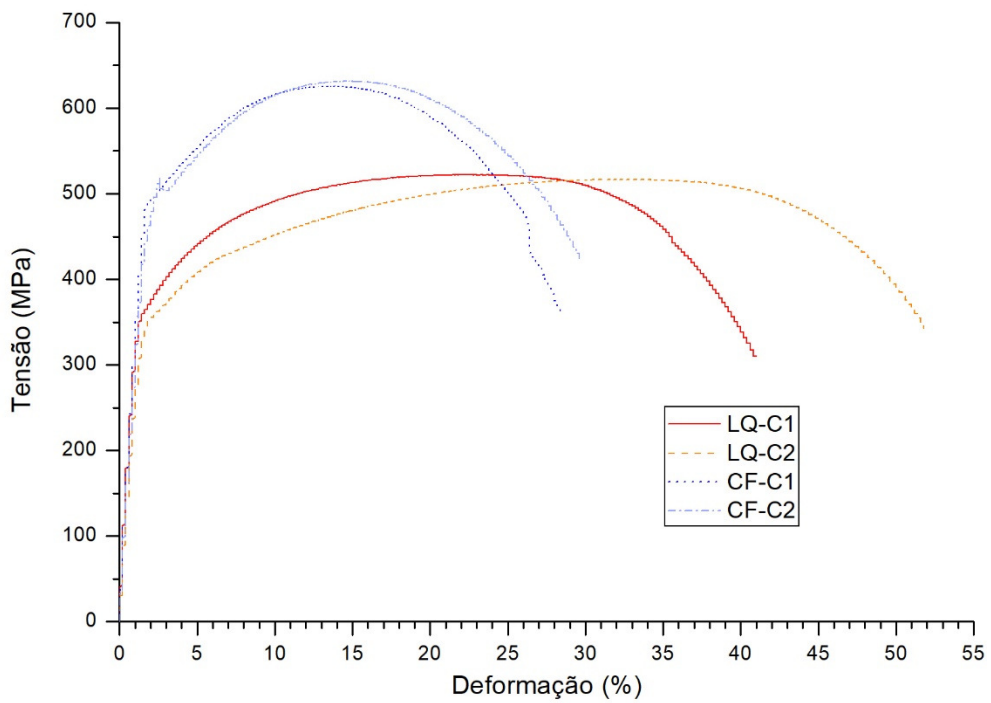
Fonte: Autor

Conforme pode ser visto na Figura 42, nas curvas tensão-deformação das amostras retiradas das faces planas o escoamento é bem definido, com o material deformando-se plasticamente sem praticamente aumento da tensão. Já nas amostras retiradas dos cantos, com exceção da CF-C2, não se observa nitidamente o fenômeno do escoamento. Além disso, entre as amostras LQ-C1 e LQ-C2 houve uma significativa variação na deformação total.

Figura 42 - Curvas tensão-deformação das amostras: (a) das faces planas; (b) dos cantos



(a)



(b)

Fonte: Autor

Os resultados dos ensaios de tração foram sumarizados na Tabela 8 onde também foram incluídas as médias e os desvios padrão além dos valores dos certificados dos tubos. Como era previsto devido a conformação a frio, o tubo CF apresentou uma maior resistência à tração e uma menor ductilidade quando comparando com o tubo LQ. Com exceção da tensão de escoamento da amostra LQ-C2, os valores ficaram dentro dos limites especificados considerando a incerteza das medições de $\pm 1\%$. Em geral, as amostras LQ obtiveram uma tensão de escoamento muito próxima ao limite da norma e na média ficaram 18% abaixo do valor do certificado. Já nas amostras do tubo CF, foram os resultados da tensão máxima de resistência à tração que ficaram próximos ao limite. A relação σ_e/σ_{mrt} de todas as amostras atenderam a recomendação das normas de design, ou seja, ficaram abaixo de 0,84.

Tabela 8 - Resultados do ensaio de tração

Amostra	σ_e MPa	σ_{mrt} MPa	Alongamento ¹ %	σ_e/σ_{mrt}
LQ-P1	359	510	37	0,70
LQ-P2	376	518	36	0,73
LQ-C1	352	523	34	0,67
LQ-C2	350	517	40	0,68
LQ-Média	359	517	37	0,69
LQ-Desvio padrão	12	5	3	0
LQ-Certificado	438	546	32	0,80
CF-P1	508	628	27	0,81
CF-P2	503	617	26	0,81
CF-C1	480	626	30	0,77
CF-C2	520	631	26	0,82
CF-Média	503	626	27	0,80
CF-Desvio padrão	17	6	2	0
CF-Certificado	508	612	28	0,83

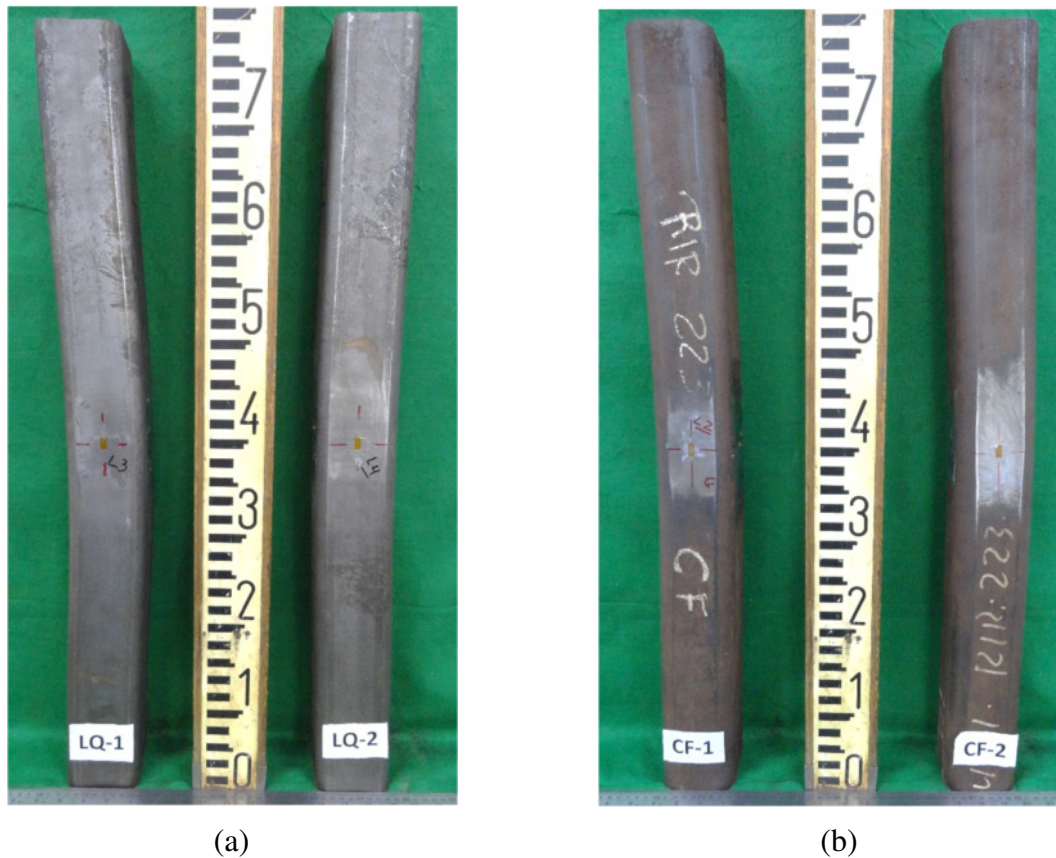
Fonte: Autor

Nota 1: $L_0 = 50$ mm

5.7 ENSAIO DE COMPRESSÃO

Neste ensaio, todos os CPs falharam por flambagem após atingirem as suas respectivas cargas críticas de compressão como pode ser visto na Figura 43.

Figura 43 - Falha típica de flambagem apresentada pelos tubos: (a) LQ; (b) CF



Fonte: Autor

Nota: escala em decímetro

A força de compressão suportada pelo tubo CF foi maior que a tubo LQ em 26%, demonstrando que o tratamento térmico realizado após a conformação a frio realmente promoveu um alívio das tensões residuais, reduzindo as suas influências negativas e mantendo assim o tubo CF com níveis mais altos de resistência. Porém, a capacidade de carga relativa ao escoamento (relação σ_{mrc}/σ_e) foi maior no tubo LQ devido as tensões residuais longitudinais ainda presentes no tubo CF.

Na Tabela 9 são apresentados os resultados do cálculo da área real da seção transversal através da massa específica do aço, a força máxima de compressão suportada por cada tubo, a tensão máxima de resistência à compressão, assim como a relação σ_{mrc}/σ_e .

Tabela 9 - Resultados do ensaio de compressão

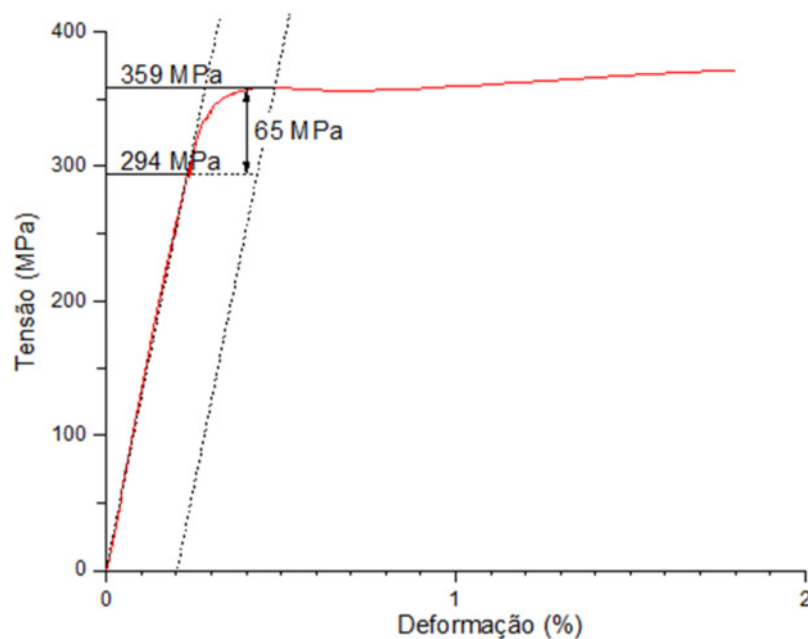
Amostra	Área mm ²	F _{máx} kN	σ _{mrc} MPa	σ _{mrc} /σ _e ¹
LQ-1	2720	1010	372	1,03
LQ-2	2727	1050	385	1,07
LQ-Média	2724	1030	378	1,05
LQ-Desvio padrão	6	28	10	0
CF-1	2643	1283	486	0,97
CF-2	2659	1303	490	0,97
CF-Média	2651	1293	488	0,97
CF-Desvio padrão	11	14	3	0

Fonte: Autor

Nota 1: a σ_e considerada foi a média conforme ensaio de tração (Tabela 8)

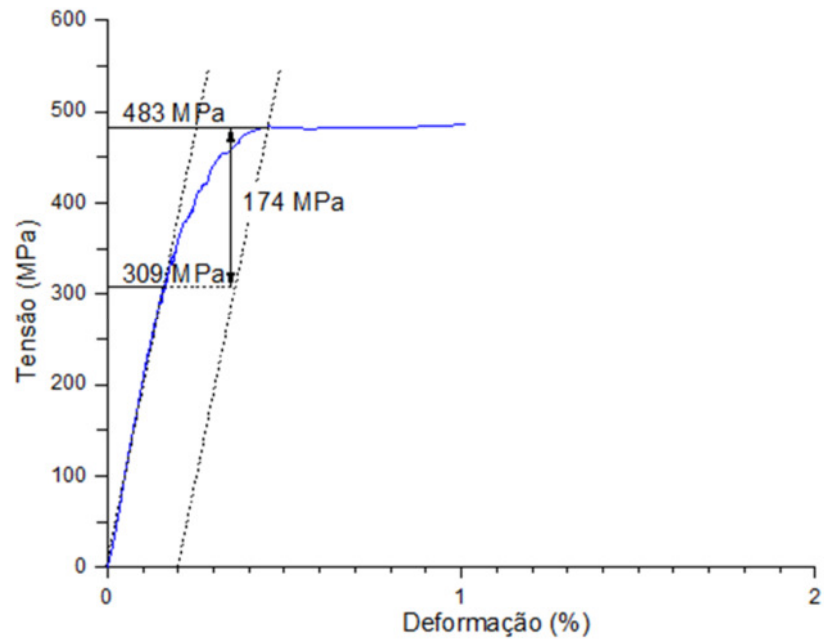
As curvas tensão-deformação típicas dos tubos LQ e CF obtidas no ensaio de compressão podem ser vistas respectivamente na Figura 44 e na Figura 45. Em ambas é possível observar o fenômeno do escoamento e a maior deformação do tubo LQ até atingir a tensão máxima. Além disso, o método proposto por Packer e Sun (2013) para estimar a tensão residual compressiva longitudinal máxima é demonstrado. Como esperado, esta tensão residual no tubo LQ foi de 65 MPa e a do tubo CF de 174 MPa, representando 18% e 36% das respectivas tensões de escoamento.

Figura 44 - Curva tensão-deformação típica do tubo LQ obtida no ensaio de compressão



Fonte: Autor

Figura 45 - Curva tensão-deformação típica do tubo CF obtida no ensaio de compressão



Fonte: Autor

6 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos nos diversos ensaios, pode-se concluir que o tubo de seção quadrada conformado a frio e com posterior tratamento térmico de alívio de tensão, produzido a partir de seção circular laminada a quente, possui:

1. Tenacidade a baixas temperaturas equivalente ao laminado a quente;
2. Maior resistência à tração e menor ductilidade que o laminado a quente. Porém, ambos os valores atendem a especificação do tubo LQ. Além disso, os resultados do ensaio de tração demonstraram que o tubo CF pode ter propriedades mecânicas ao redor do seu perímetro tão homogêneas quanto as do tubo LQ;
3. Maior resistência à compressão que o laminado a quente.

Desta forma, a seção quadrada conformada a frio com alívio de tensão analisada neste trabalho apresenta-se equivalente estruturalmente à laminada a quente mesmo em aplicações a baixas temperaturas.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Estender este estudo comparativo aos tubos quadrados e retangulares de parede delgada, inferior a 6 mm, a fim de verificar se os resultados serão similares aos apresentados neste trabalho;
2. Realizar ensaios de fadiga para comparar a vida útil dos tubos laminados a quente com os conformados a frio sob carregamento dinâmico;
3. Avaliar se as condições e parâmetros de soldagem para os perfis conformados a frio devem ser diferentes dos laminados a quente.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8/E8M**: standard test methods for tension testing of metallic materials. West Conshohocken, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E9**: standard test methods of compression testing of metallic materials at room temperature. West Conshohocken, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E23**: standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials. West Conshohocken, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E384**: standard test method for microindentation hardness of materials. West Conshohocken, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A500/A500M**: standard specification for cold-formed welded and seamless carbon steel structural tubing in rounds and shapes. West Conshohocken, 2018.

ASM INTERNATIONAL. **Properties and selection**: irons, steels, and high-performance alloys. ASM Handbook. 10th. ed. ASM, 1990. 2521 p.v.1.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 882 p.

DEUTSCHE NORM. **DIN 2391-2**: seamless precision steel tubes; technical delivery conditions. Berlin, 1994.

ESTRUTURAS TUBULARES. **Shopping Salvador**. Disponível em: <<http://www.estruturastubulares.com/Obras/SitePages/Shopping%20Salvador.aspx>>. Acesso em: 21 abr. 2018.

EUROPEAN STANDARD. **EN 1993-1-1**: eurocode 3: design of steel structures - part 1-1: general rules and rules for buildings. Bruxelas, 2005.

EUROPEAN STANDARD. **EN 10210-1**: hot finished structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels - part 1: technical delivery conditions. Bruxelas, 2006.

EUROPEAN STANDARD. **EN 10210-2**: hot finished structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels - part 2: tolerances, dimensions and sectional properties. Bruxelas, 2006.

EUROPEAN STANDARD. **EN 10219-1**: cold formed welded structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels - part 1: technical delivery conditions. Bruxelas, 2006.

GARDNER, L.; SAARI, N.; WANG, F. Comparative experimental study of hot-rolled and cold-formed rectangular hollow sections. **Thin-Walled Structures**, v. 48, p. 495-507, apr. 2010.

IBUKU. **Why Bamboo**. Disponível em: <<http://ibuku.com/about/why-bamboo>>. Acesso em: 19 abr. 2018a.

IBUKU. **Sharma springs residence**. Disponível em: <<http://ibuku.com/sharma-springs-residence>>. Acesso em: 19 abr. 2018b.

KOSTESKI, N.; PACKER, J. A.; PUTHLI, R. S. Notch toughness of internationally produced hollow structural sections. **Journal of Structural Engineering**, New York, v. 131, n. 2, p. 279-286, Feb. 2005.

LIEBHERR. **Liebherr 150 EC-B flat-top crane on the zugspitze**: construction crane on Germany's highest peak ready for use. Disponível em: <<https://www.liebherr.com/en/prt/latest-news/news-press-releases/detail/liebherr-150-ec-b-flat-top-crane-on-the-zugspitze-construction-crane-on-germany-s-highest-peak-ready-for-use.html#lightbox>>. Acesso em: 5 jun. 2018.

LIU, D. et al. Structural behavior of extreme thick-walled cold-formed square steel columns. **Journal of Constructional Steel Research**, London, v. 128, p. 371-379, sep. 2016.

LIU, Z. et al. Structural behavior of cold-formed thick-walled rectangular steel columns. **Journal of Constructional Steel Research**, London, v. 147, p. 277-292, Apr. 2018.

MENDES, F. C. **Análise teórica-experimental de ligações tipo “T”, “K” e “KT” com perfis metálicos tubulares**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Construção metálica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008. Disponível em: <[http://www.estruturastubulares.com/Downloads/SitePages/Dissertações e Teses.aspx](http://www.estruturastubulares.com/Downloads/SitePages/Dissertações_e_Teses.aspx)>. Acesso em: 9 jul. 2018.

PACKER, J. A.; SUN, M. Direct-formed and continuous-formed rectangular hollow sections - Comparison of static properties. **Journal of Constructional Steel Research**, London, v. 92, p. 67-78, nov. 2013.

PUTHLI, R.; PACKER, J. A. Structural design using cold-formed hollow sections. **Steel Construction**, Berlin, v. 6, n. 2, p. 150-157, feb. 2013.

SEDLACEK, G. et al. Selection of materials to avoid brittle fracture (toughness requirements). In:____. **Commentary and worked examples to EN 1993-1-10 “Material toughness and through thickness properties” and other toughness oriented rules in EN 1993**. Luxembourg: European Commission Joint Research Centre, 2008. p. 13-109.

SUN, M.; PACKER, J. A. Charpy V-notch impact toughness of cold-formed rectangular hollow sections. **Journal of Constructional Steel Research**, London, v. 97, p. 114-126, mar. 2014.

SUN, M.; PACKER, J. A. Hot-dip galvanizing of cold-formed steel hollow sections: a state-of-the-art review. **Frontiers of Structural and Civil Engineering**, Berlin, p. 1-17, June 2017.

TONG, L. et al. Experimental investigation on longitudinal residual stresses for cold-formed thick-walled square hollow sections. **Journal of Constructional Steel Research**, London, v. 73, p. 105-116, mar. 2012.

VALLOUREC. **Technical Information 1**. Düsseldorf, 2012. 56 p.

VALLOUREC. **The difference between hot and cold-formed hollow sections in terms of hardness distribution**. Disponível em: <<http://www.vallourec.com/constructionsolutions/EN/Products/Documents/Haarteverteilung.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2018.

VOORT, G. F. V. **Metallography and microstructures of low-carbon and coated steels**. ASM Handbook. Ohio: ASM, 2004. p. 588-607. v.9.

WANG, J. et al. Material properties and compressive local buckling response of high strength steel square and rectangular hollow sections. **Engineering Structures**, Oxford, v. 130, p. 297-315, nov. 2016.

WARDENIER, J. et al. **Hollow sections in structural applications**. 2nd. ed. Zoetermeer: CIDECT, 2010. 232 p. Disponível em: < <http://www.cidect.org/books/>>. Acesso em: 7 jul. 2018.

ZHANG, X. Z. et al. Comparative experimental study of hot-formed, hot-finished and cold-formed rectangular hollow sections. **Case Studies in Structural Engineering**, Amsterdam, v. 6, p. 115-129, sep. 2016.

ZHU, A. et al. Experimental study and analysis of inner-stiffened cold-formed SHS steel stub columns. **Thin-Walled Structures**, Amsterdam, v. 107, p. 28-38, jun. 2016.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E3**: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. West Conshohocken, 2011.

VALLOUREC & MANNESMANN TUBES. **Hot-Rolled MSH Sections for Mechanical Engineering and Civil Construction**. Düsseldorf, 2012. 24p.