

Efeitos do Tratamento Térmico de Alívio de Tensões em Soldas realizadas com Eletrodos Revestidos Rútílicos em Aços de Alta Resistência e Baixa Liga

Effects of Welding Voltage Relieving Heat Treatment with Ruthenium Coated Electrodes on High Strength and Low Alloy Steels

Rafael Henrique de Oliveira^a; Vinícius Alves Martins^{a*}

^aCentro Universitário Anhanguera de Campo Grande, Curso de Engenharia Mecânica, MS, Brasil

*E-mail: vinicius_martins@anhanguera.com

Resumo

Este trabalho visa realizar um estudo comparativo entre soldas realizadas com eletrodos revestidos E6013, E6013 com tratamento térmico de alívio de tensões e E7018, todos em metal base de aço CSN COR-420. A justificativa do presente estudo está na falta de informações sobre os processos de soldagem realizados com eletrodos rútilicos E6013, nas montagens de estruturas metálicas nos canteiros de obras brasileiros. Desta forma, o objetivo foi comparar propriedades mecânicas e correlacionar com sua morfologia microestrutural nos três processos de soldagem. A metodologia adotada foi a análise experimental, na qual foram soldadas chapas metálicas de aço CSN COR-420, em ambientes não controlados, visando desta forma simular as atividades realizadas na maioria dos canteiros de obras pequenas. Após a soldagem utilizando-se os três processos citados, foram realizados ensaios de Dureza na escala Rockwell, ensaios de Tração Uniaxial e Metalografia Óptica. Os resultados apresentam um ganho de resistência mecânica, quando se realiza o tratamento térmico de alívio de tensões na soldagem feita com eletrodo revestido E6013, porém mesmo tratado termicamente este ainda apresenta uma resistência mecânica menor que a soldagem realizada com eletrodo E7018. E a metalografia mostra que as microestruturas não apresentam grandes alterações morfológicas entre os tipos de soldagem ensaiados, mas se percebe claramente o refino de grão na soldagem tratada termicamente, o que justifica o incremento de resistência mecânica para este caso.

Palavras-chave: Soldagem. Eletrodo Revestido. Tratamento Térmico. Propriedades Mecânicas. Morfologia Microestrutural.

Abstract

This work aims to perform a comparative study among welds made with E6013, E6013 coated electrodes with tensile relief heat treatment and E7018, all in CSN COR-420 steel metal base. The justification of the present study is the lack of information on the welding processes performed with E6013 ruthenium electrodes in the metal structures assembly in Brazilian construction sites. Therefore, the objective was to compare mechanical properties and correlate with their microstructural morphology in the three welding processes. The methodology adopted was the experimental analysis, where CSN COR-420 steel sheets were welded in uncontrolled environments, in order to simulate the activities performed in most of the small construction sites. After welding using the three processes cited, tests were performed on Rockwell's Hardness, Uniaxial Traction and Optical Metallography tests. The results show a mechanical resistance gain when the thermal treatment of stress relief is carried out in the welding made with coated electrode E6013, however, even when treated thermally it still presents a lower mechanical resistance than the welding performed with electrode E7018. And the metallography shows that the microstructures do not present major morphological alterations among the types of welding tested, but it is clear the grain refining in the thermally treated welding, which justifies the mechanical resistance increase in this case.

Keywords: *Welding. Coated Electrode. Heat Treatment. Mechanical Properties. Microstructural Morphology.*

1 Introdução

A Norma Brasileira NBR-8800 recomenda que sejam utilizadas ligações através de conectores nas montagens de estruturas metálicas com objetivo de se evitar a utilização de juntas soldadas em obras. Com esta medida, o citado documento de referência brasileiro pretende evitar problemas nas uniões realizadas em campo, pois o controle de qualidade destas soldas, geralmente, é inapropriado ou simplesmente não existe.

Por outro lado, a realidade brasileira das montagens de estruturas metálicas reflete o desconhecimento e a negligência com que os montadores tratam o processo de soldagem, principalmente, nas obras que utilizam de perfis formados a frio. Ao visitar canteiros de obras se depara facilmente

com soldas sendo realizadas com eletrodos incompatíveis com o metal base soldado, condições de armazenamento inadequadas, regulagem de máquinas inapropriadas, falta de EPI's, entre outros problemas. Obviamente, existem exceções a este cenário, que em sua maioria são montagens realizadas por empresas de grande porte.

Segundo Modenesi, Marques Santos (2012), a soldagem é um dos mais importantes processos de fabricação de estruturas metálicas, e sua utilização ganhou força desde as grandes guerras, em que este processo construtivo teve papel importante na indústria naval, aeronáutica e bélica. Desde então, este processo é tema de estudos e pesquisas em universidades e escolas técnicas visando o melhor desempenho da atividade.

Existem muitos processos de soldagem já desenvolvidos,

patenteados e utilizados na produção metálica brasileira, entre esses se destacam as soldas em proteção gasosa (*Gas Metal Arc Welding* - GMAW), soldas em arco submerso (*Submerged Arc Welding* - SAW), soldas com fluxo no núcleo (*Fluxed Cored Arc Welding* - FCAW) e soldas com utilização de eletrodos revestidos (*Shielded Metal Arc Welding* - SMAW). Cada processo apresenta sua característica própria e aplicação recomendada, e neste trabalho, serão tratadas algumas propriedades e características das soldas com eletrodos revestidos realizadas em aços de alta resistência e de baixa liga.

A opção por se estudar especificamente este problema se justifica na grande demanda do aço supracitado em montagens de estruturas metálicas, quando comparado com aços carbono comuns. Podem ser citados como aços carbono comuns o AISI SAE-1008, AISI SAE-1010, AISI SAE-1020, ASTM A-36, entre outros. Já os aços de alta resistência e de baixa liga (ARBL) têm como exemplos no mercado o ASTM A-572, USI-SAC, CSN-COR, e outros em menor escala.

Assim, o objetivo do artigo implica em avaliar algumas propriedades mecânicas e a morfologia microestrutural do aço CSN COR-420 soldado com eletrodos revestidos E6013 (rutilicos e não recomendados para este tipo de aço), comparando os resultados com ensaios realizados para o mesmo tipo de aço soldado com eletrodos E7018 (básicos e recomendados para este tipo de aço). E como proposta, o aço soldado com eletrodo rutilico será tratado, termicamente, com o objetivo de amenizar a fragilidade da solda.

2 Material e Métodos

2.1 Metalurgia

Serão abordados alguns pontos importantes sobre análise microestrutural, características e propriedades dos materiais utilizados no trabalho, bem como alguns defeitos relacionados ao processo de soldagem escolhido. Esses temas são importantes e necessários para compreensão do estudo.

2.1.1 Microestrutura

Ao analisar as propriedades metalúrgicas do material é possível realizar correlações com o comportamento físico-mecânico do mesmo, e a metalurgia física objetiva entender como essas transformações ocorrem em nível microestrutural.

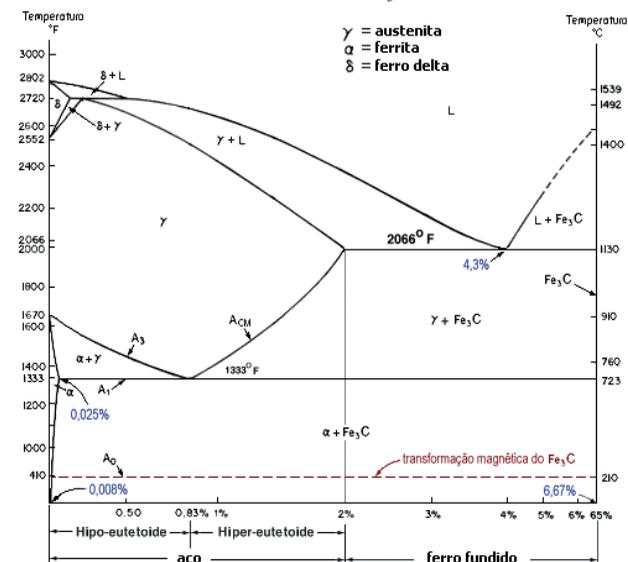
Conforme afirma Chiaverini (2012), aço é uma liga Ferro-Carbono, contendo geralmente de 0,008% até aproximadamente 2,11% de Carbono, além de certos elementos secundários como Mn, P e S presentes devido aos processos de fabricação.

O entendimento da resposta do material ao esforço mecânico aplicado está diretamente ligado à análise microestrutural dele. Callister (2008) define microestrutura como a forma com que ocorrem arranjos atômicos e suas relações com as propriedades dos materiais.

Este estudo de microestrutura é facilitado, quando se lança

mão de um Diagrama de Fases. A Figura 1 ilustra o diagrama de fases metaestáveis do Ferro-Carbono ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$).

Figura 1 - Diagrama de fases de $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$



Fonte: Os autores.

Callister (2008) define as transformações que ocorrem no diagrama da Figura 1, da seguinte forma:

O ferro puro, ao ser aquecido, experimenta duas mudanças na sua estrutura cristalina antes de se fundir. À temperatura ambiente, a forma estável, conhecida como Ferrita ou Ferro α , possui uma estrutura cristalina CCC. Na temperatura de 912 °C, a Ferrita experimenta uma transformação polimórfica para Austenita ou Ferro γ , que possui estrutura cristalina CFC. Esta Austenita persiste até 1.394 °C, temperatura em que a Austenita CFC reverte novamente a uma fase com estrutura cristalina CCC, conhecida como Ferro δ , e que finalmente se funde à temperatura de 1.538 °C. A Cementita (Fe_3C) se forma quando o limite de solubilidade para o Carbono na Ferrita é excedido.

Além desses conhecimentos prévios sobre microestrutura, trata-se agora da apresentação de algumas informações sobre os aços ARBL ou também chamados de patináveis e, ainda, sobre os eletrodos que serão utilizados neste trabalho.

2.2 Materiais analisados

Os aços patináveis são aqueles em que são introduzidos elementos de ligas como o Cromo, Cobre e Fósforo com o objetivo de ter sua resistência mecânica e resistência ao desgaste causados por intempéries aumentados (PANNONI; WOLYNEC, 1989).

Existem hoje vários produtos desses tipos disponíveis no mercado, mas inicialmente eles eram conhecidos apenas como COR-TEN, termo de origem inglesa que significa resistência à corrosão e à tração, “*corrosion resistance and tensile strenght*”.

A resistência à corrosão é aumentada por conta de uma camada de óxido que surge na superfície do material, a qual é chamada de Pátina. Pannoni e Wolyneec (1989) afirmam que, devido a fatores como exposição a intempéries, composição

química do aço e até a geometria da peça influenciam na formação desta camada compacta de óxido, porém não se deve confundir pátina com a oxidação, que ocorre em aços carbono comuns.

O aço CSN COR-420, utilizado no estudo, é fabricado pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) e tem sua composição química ilustrada no Quadro 1.

Quadro 1 - Dados do aço CSN COR-420

Norma Técnica	Composição Química (%)								
	C max.	Mn max.	P max.	S max.	Cu	Si max.	Nb max.	Al	Cr
CSN COR 4420	0,17	1,00	0,025	0,025	020-0,50	0,35	-	0,015-0,17	0,55-0,80

Fonte: Companhia Siderúrgica Nacional (CSN)

Esse aço é soldado com eletrodo revestido E6013, que contém alto teor de Dióxido de Titânio (Rutilo – TiO_2) e, também, com eletrodo revestido E7018 (Básico – baixo hidrogênio). O arame do E6013 contém aproximadamente 0,07% de Carbono com revestimento rutilico, que é composto por Potássio para estabilizar o arco na soldagem com corrente alternada. Também contém a presença dos elementos residuais de liga Mn (0,35%) e Si (0,20%). Devido a baixa penetração é recomendado para soldagens de chapas finas e metais de pequena espessura.

Já o eletrodo E7018 apresenta, em sua composição, pó de ferro o que deixa o arco elétrico mais suave e diminui os respingos, além de teores em 0,07% de Carbono, 1,30% de Manganês e 0,50% de Silício.

2.3 O Hidrogênio e a solda

A característica higroscópica dos revestimentos dos eletrodos de solda facilita a captura do Hidrogênio presente no vapor de água durante as operações de soldagem e, por conseguinte, esse elemento permanecerá como inclusão no metal de solda.

As altas temperaturas utilizadas durante o processo de soldagem fazem com que ocorra a dissociação do Hidrogênio atômico, em que parte se evade durante o processo de resfriamento, porém outra porção deste elemento químico dissociado permanece na poça de fusão e fará parte da Zona Termicamente Afetada (ZTA) (SILVA; PARANHOS, 2003).

Caloi (2008) afirma que o Hidrogênio residual não se difunde do metal de solda, sendo assim, o mesmo permanece muito tempo na peça soldada, o que por sua vez pode influenciar no surgimento de trincas a frio com origem retardada.

E, além disso, Wainer, Brandi e Mello (1990) sugerem que a trinca a frio por Hidrogênio ocorre também quando algumas condições existem, tais como: a presença de Hidrogênio, tensão residual de tração, microestrutura suscetível, baixa temperatura e a presença de Martensita em aços ARBL.

3 Resultados e Discussão

Como pode ser observado, na literatura técnica existente sobre o assunto, verificam-se alguns fatores, que podem influenciar na ocorrência da trinca a frio por Hidrogênio e fragilização da solda. E no contexto das soldas realizadas em canteiros de montagem de estruturas metálicas, em que infelizmente se constata a negligência com os cuidados técnicos da soldagem, podem-se observar muitos destes fatores.

Entre os principais colaboradores para existência do problema observado, comumente “in loco”, estão a baixa temperatura do metal de base no momento da soldagem (na maioria dos casos não é feito preaquecimento na peça), presença de Hidrogênio existente no vapor de água do ambiente aberto, microestrutura suscetível e presença de Martensita no aço ARBL.

Desta forma, este trabalho simulou as condições de soldagem destes canteiros, ou seja, foram preparadas tiras de aço CSN COR-420, que foram soldadas por um operador comum, e foram utilizados para isso eletrodos E6013 e E7018, lembrando-se que a regulagem da máquina foi realizada pelo soldador. Não foi especificado nenhum parâmetro para realização do processo e tão pouco foi feito preaquecimento nas peças. As chapas tiveram suas dimensões pré-determinadas em função dos equipamentos disponíveis em laboratório, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 - Chapa de aço com os tamanhos das tiras pré-determinados



Fonte: Autor.

Após determinação das dimensões das tiras, o material foi cortado em uma Prensa Newton tipo Guillotina para realização da soldagem, a Figura 3 apresenta um dos corpos de prova após a soldagem.

Figura 3 - Tiras de aço soldadas para realização dos ensaios



Fonte: Autor

Uma vez feita a soldagem das tiras, os materiais foram adequados, conforme os tipos de ensaios a serem realizados. Para realização do ensaio de Dureza, os corpos de prova (CP's) foram cortados em tiras de $(27 \times 15 \times 5) \text{mm}^3$ soldados ao meio, e foi utilizado um Durômetro de Bancada Analógico para ensaio em escala Rockwell Normal. Executou-se as identificações de 1 em 1mm com o objetivo de se caracterizar o perfil de Dureza da seção transversal do CP, e para todos os testes, inicialmente, usou-se uma pré-carga de 0,10kN e, posteriormente, uma segunda de 1,50kN. A Figura 4 apresenta o Durômetro (esquerda) e o CP após o ensaio (direita).

Figura 4 - Durômetro utilizado (esquerda) e CP's ensaiados (direita)



Fonte: Autor

Para o ensaio de tração, foram preparados CP's com dimensões de $(250 \times 21 \times 5) \text{mm}^3$ soldados ao meio, em que se utilizou uma Máquina de Ensaio Mecânicos com saída

digital. Foram submetidos 12 (doze) corpos de prova ao esforço uniaxial de tração com o objetivo de se obter os limites de escoamento e ruptura dos mesmos. A Figura 5 apresenta a máquina (esquerda) e os corpos de prova ensaiados (direita).

Figura 5 - Máquina de Ensaio Mecânicos (esquerda) e CP's ensaiados (direita)



Fonte: Autor

Já na metalografia óptica foi utilizado uma Policorte Metalográfica Refrigerada, uma Embutidora Metalográfica, Máquina de Lixamento Semiautomática com Circulação de Água, Politriz Semiautomática com Circulação de Água e Microscópio Óptico de Reflexão. Os corpos de prova utilizados possuíam dimensões de $(27 \times 15 \times 5) \text{mm}^3$ soldados ao meio. O procedimento se iniciou com corte dos CP's nas dimensões supracitadas, seguidas de lixamento e polimento, em que foram utilizadas as sequências de lixas de granulometria 220, 300 e 600 micras e, posteriormente, realizado o polimento com Alumina de 9, 6 e 3 microns. Após as operações de corte, lixamento e polimento foi realizado ataque químico com solução de Nital a 1% na superfície a ser analisada no microscópio. A microscopia foi realizada com utilização de óleo de imersão em lentes que possibilitam o aumento de 40x e 100x o tamanho natural, no qual o óleo ampliou esta capacidade em 10x, possibilitando assim um aumento final de 400x e 1000x. A Figura 6 apresenta os equipamentos utilizados na microscopia óptica.

Figura 6 - Da esquerda para direita: Embutidora, Cortadora, Lixadeira, Politriz e Microscópio



Fonte: Autor

Nesta etapa serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de Dureza, Tração Uniaxial e a Metalografia Óptica para este trabalho.

O ensaio de Dureza foi realizado com identificações de 1

em 1mm de modo a se obter o maior número de medidas possíveis sem que houvesse a interferência de um ponto com outro. Desta forma, obtiveram-se os valores médios por região da solda (Quadro 2).

Quadro 2 - Valores médios do ensaio de Dureza (HRC) por parte da solda

Valores Médios de Dureza HRC			
	MB	ZTA	Cordão de Solda
Juntas soldada com E6013	95,66	94,66	100,25
Juntas soldada com E6013 Tratada	93,5	95,33	101
Juntas soldada com E7018	94,87	96,83	100,16

Fonte: Dados da pesquisa.

Observa-se, no Quadro 2, que de maneira geral os valores aumentam em direção ao cordão de solda e diminuem no inverso, pois os valores apresentados para o Metal Base (MB) são menores que os valores da Zona Termicamente Afetada (ZTA) que, por sua vez, são inferiores as Durezas encontradas para o Cordão de Solda.

Conforme descrito na metodologia, foi realizado o ensaio de Tração Uniaxial nos CP's soldados com o objetivo de analisar as diferenças destes materiais. O Quadro 3 traz os resultados obtidos.

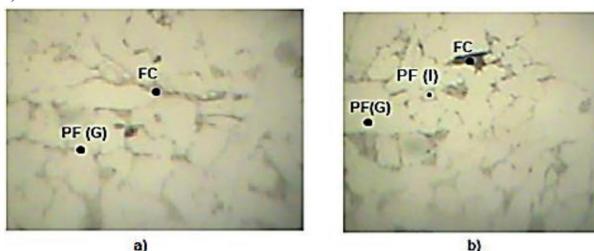
Quadro 3 - Valores médios das tensões nas juntas ensaiadas

Valores Médios de Dureza HRC		
	Escoamento	Máxima
Juntas soldada com E6013	181,74	208,47
Juntas soldada com E6013 pós TTAT	221,59	241,66
Juntas soldada com E7018	253,50	287,17

Fonte: Dados da pesquisa.

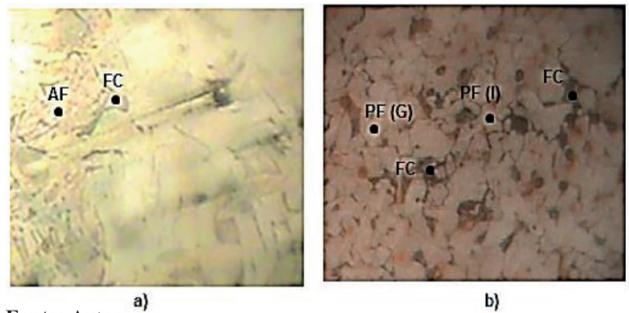
De acordo com a hipótese proposta, inicialmente, neste trabalho, observa-se que os resultados apresentam um aumento dos valores de tensão de escoamento e de tensão de ruptura, quando se observa a solda realizada com eletrodo rutilico, rutilico tratado e básico, respectivamente. Para finalizar a apresentação dos resultados, tem-se nas Figuras 7, 8 e 9 as imagens microestruturais obtidas no ensaio de metalografia óptica.

Figura 7 - Micrografia do aço CSN COR-420 soldado com eletrodo E6013, com ataque de Nital a 1%. a) Aumento de 400x e b) Aumento de 1000x



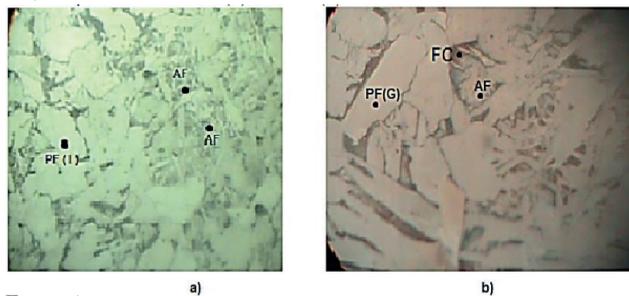
Fonte: Autor

Figura 8 - Micrografia do aço CSN COR-420 soldado com eletrodo E6013 TTAT, com ataque de Nital a 1%. a) Aumento de 400x e b) Aumento de 1000x



Fonte: Autor

Figura 9 - Micrografia do aço CSN COR-420 soldado com eletrodo E7018, com ataque de Nital a 1%. a) Aumento de 400x e b) Aumento de 1000x



Fonte: Autor

Na simples observação das micrografias, observa-se a presença de Ferrita Acicular (AF) em todos os CP's. Segundo Hashimoto (2004), este constituinte apresenta estrutura entrelaçada e granulação fina e isto tende a desviar a propagação de trincas microestruturais, aumentando assim a resistência mecânica do material.

Outrossim, é a presença de Ferrita de Contorno de Grão [PF(G)], na forma de veios, na estrutura dos grãos colunares de Austenita, também observado para os três tipos de corpos de prova ensaiados. Percebe-se ainda a existência de agregado de Ferrita-Carboneto (FC) constituinte que inclui a Perlita, Bainita Inferior e a Austenita-Martensita (de difícil identificação na microscopia óptica). É notório também o refinamento dos grãos nas soldas realizadas com eletrodo E6013 tratado termicamente.

4 Conclusão

Foi proposta uma comparação mecânica e morfológica entre soldas realizadas com eletrodo E6013, sabidamente inadequados para o metal base em aço ARBL, com soldas realizadas através de eletrodo E7018, o qual é adequado ao tipo de soldagem. Com o objetivo de se verificar as consequências de um tratamento térmico pós-soldagem foi realizado um tratamento térmico de alívio de tensões.

Conclui-se que os perfis de dureza praticamente não se alteraram, quando comparados os três procedimentos, indicando que este parâmetro é pouco eficiente para este tipo de comparação.

Conforme hipótese adotada inicialmente neste trabalho,

pode-se afirmar que houve ganho de resistência mecânica entre os corpos de provas analisados, nos quais em ordem crescente se tem a solda realizada com E6013, E6013 TTAT e E7018.

Por meio da análise morfológica, os resultados indicam que não há aproximação microestrutural do eletrodo E6013 TTAT com a solda realizada com o E7018, todavia, o que fica evidente é o refinamento do grão na solda rutílica tratada, o que afirma os trabalhos de Hall-Petch, nos quais se justificam o incremento na resistência mecânica também observada nos ensaios.

Referências

CALLISTER, W.D. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CALOI, G. *Análise da soldabilidade do aço API 5L X-80 por meio dos testes Tekken e de implante*. 2008. Rio de Janeiro: PUC, 2008.

CHIAVERINI, V. *Aços e ferro fundidos*. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 2012.

HASHIMOTO, T.M. *Caracterização mecânica e microestrutural de um aço médio carbono com estruturas bainíticas e multifásicas*. Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista, 2004.

MODENESI, P.J.; MARQUES, P.V.; SANTOS, D.B. *Introdução à metalurgia da soldagem*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

PANNONI, F.D.; WOLYNEC, S. 1989. A ferrugem que protege. *Ciência Hoje*, v.10, n.57, p.54-59, 1989.

SILVA, C.L.J.; PARANHOS, R. Fissuração pelo hidrogênio “trincas a frio”. *Infosolda*, 2003. Disponível em: < 48 <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EME733/Trinca%20a%20frio.pdf>> Acesso em: 25 abr. 2017.

TRIVIÑOS, A.N.S. *Introdução à pesquisa em ciências sociais: a pesquisa qualitativa em educação*. São Paulo: Atlas, 1987.

WAINER, E., BRANDI, S. D.; MELLO, F.D.H.D. *Soldagem, processos e metalurgia*. São Paulo: Edgard Blucher, 1992.