

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

COMPOSIÇÃO, FABRICAÇÃO E ANÁLISE DE ELETRODO REVESTIDO

por

Bruno Heerdt Veiga

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2011

COMPOSIÇÃO, FABRICAÇÃO E ANÁLISE DE ELETRODO REVESTIDO  
por

Bruno Heerdt Veiga

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Prof. Dr. Flávio José Lorini

Porto Alegre, 12 de dezembro de 2011.

## AGRADECIMENTO

A realização deste trabalho foi possível devido à ajuda, orientação e esclarecimentos das pessoas a seguir citadas. Meus sinceros agradecimentos:

Aos que participaram das etapas no campus do vale: Eng. Ana Paula Perotti, técnico Luiz H. M. Zaniratti, Prof. Dr. José A. E. Mazzaferro, Samir Ismail e Marcelo Gomes Caju.

Ao Prof. Dr. Ivan Guerra Machado por disponibilizar o laboratório de soldagem e técnicas conexas (LS&TC) situado no centro de tecnologia do campus do vale da UFRGS.

Aos funcionários e bolsistas do laboratório de metalurgia física (LAMEF), situado no campus central da UFRGS, especialmente ao Dr. Márcio Levi Kramer de Macedo e ao bolsista Anderson.

Em especial ao Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez pela idéia, apoio, incentivo e paciência no decorrer de todo o trabalho.

VEIGA, B.H. **COMPOSIÇÃO, FABRICAÇÃO E ANÁLISE DE ELETRODO REVESTIDO**. 2011. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

## **RESUMO**

A soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (*Shielded Metal Arc Welding – SMAW*) é um processo manual de soldagem que visa à união de materiais através do calor gerado por um arco elétrico mantido entre a extremidade de um eletrodo metálico revestido e a peça de trabalho. Existem inúmeras composições diferentes de eletrodos revestidos, por isso é de extrema importância conhecer o comportamento destes eletrodos, bem como as características esperadas da solda. Neste trabalho é proposta uma composição de revestimento utilizando elementos de fácil obtenção e de baixo custo. Após a soldagem do eletrodo resultante, diversos parâmetros são medidos e analisados a fim de, principalmente, verificar a possibilidade desse eletrodo ser utilizado como matriz para a análise de futuras adições de elementos de liga no revestimento de eletrodos. Dentre essas medições destacam-se a composição química no metal de solda e a quantidade de hidrogênio difusível. Por fim, indica-se a matriz descrita neste trabalho para a adição de elementos de liga em futuros estudos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Eletrodo revestido, soldagem manual, fabricação.

VEIGA, B. H. Composition, manufacture and analyses of coated electrode. 2011. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

## **ABSTRACT**

The electric arc welding with coated electrodes (*Shielded Metal Arc Welding - SMAW*) is a manual welding process that seeks the union of material through the heat generated by an electric arc maintained between the edge of a coated metal electrode and the workpiece. There are many different compositions of coated electrodes, so it is extremely important to know the behavior of these electrodes, as well as the expected characteristics of the weld. This paper proposes using a coating composition which are easy to obtain and at low cost. After welding the resultant electrode, several parameters are measured and analyzed in order to mainly check the possibility of this electrode being used as a matrix for the analysis of future additions of alloying elements in the coating of electrodes. Among these measures include the chemical composition in the weld metal and the amount of diffusible hydrogen. Finally, the matrix described in this paper it's indicated for the addition of alloying elements in future studies.

**KEYWORDS:** Coated electrode, manual welding, manufacture.

## ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO .....	1
2.	OBJETIVOS .....	1
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	1
3.1	Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido.....	1
3.2	Soldagem a arco elétrico por gravidade.....	2
3.3	Funções do eletrodo revestido.....	3
3.4	Tipos de eletrodo revestido.....	3
3.5	Características dos elementos químicos presentes na composição escolhida.....	3
4.	METODOLOGIA .....	4
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	6
6.	CONCLUSÕES .....	13
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	13
	Apêndice I .....	15

## 1. INTRODUÇÃO

Soldagem é o processo de união de materiais usado para obter a coalescência (união) de metais e não metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição [American Welding Society - AWS].

Dentre os diversos processos existentes de soldagem, a soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (*shielded metal arc welding - SMAW*) destaca-se pela grande versatilidade, baixo custo de operação, simplicidade dos equipamentos necessários e possibilidade de uso em locais de difícil acesso ou sujeitos a fortes ventos [Fortes, 2005].

Em 1900, A.P. Strohmenger introduziu um arame revestido com uma fina camada de argila, para melhor estabilização do arco elétrico; em 1910, Oscar Kjellberg obteve patente para eletrodos revestidos (solicitada em 1907); em 1927, C.B. Langstroth e G.G. Wunder desenvolveram o processo de extrusão do revestimento na alma do eletrodo [Machado, 1996].

Os eletrodos revestidos são compostos por uma alma metálica circundada por um composto de matérias orgânicas, minerais ou uma combinação de ambas, denominado revestimento [Meleiro, 1981], devido ao elevado número de compostos existentes, portanto, há inúmeras possibilidades de formulação para o revestimento. Os materiais constituintes do revestimento ditam algumas das características obtidas no cordão de solda, tais como quantidade de escória, penetração, quantidade de hidrogênio difusível, resistência mecânica, aspecto visual, etc.

Neste trabalho o objetivo é analisar os parâmetros de soldagem, as características do cordão de solda e as informações obtidas pós-soldagem de um eletrodo revestido com uma composição própria utilizando materiais de fácil obtenção no mercado e de baixo custo.

Esses materiais e suas proporções, que serão descritos posteriormente, são consequência do projeto de pesquisa “Desenvolvimento de Eletrodos Revestidos para Recobrimento Protetor de Componentes Submetidos a Condições de Desgaste Abrasivo” do programa de cooperação interuniversitária CAPES/MES-Cuba 071/09 realizado em parceria da UFRGS com a Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (de Cuba).

As etapas de fabricação, soldagem e análise dos parâmetros de soldagem foram realizadas no laboratório de soldagem e técnicas conexas (LS&TC), situado no centro de tecnologia do campus do vale da UFRGS, e a análise química do metal de solda e do metal base realizada no laboratório de metalurgia física (LAMEF), situado no campus central da UFRGS.

## 2. OBJETIVOS

Esse trabalho tem como principais objetivos:

- avaliar se a formulação proposta poderá ser utilizada como matriz para a análise de futuras adições de elementos de liga no revestimento de eletrodos;
- verificar o intervalo de corrente de soldagem para a utilização do eletrodo extrudado;
- analisar a pós-soldagem do revestimento (acabamento, trincas superficiais, composição química do metal de solda);
- verificar a formação de escória;
- caracterizar a geometria do cordão de solda;
- medir a quantidade de hidrogênio difusível depositado no metal de solda.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido

A soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido é um processo no qual a fusão do metal é produzida pelo aquecimento de um arco elétrico, mantido entre a ponta de um eletrodo

revestido e a superfície do metal de base a ser soldada. Durante a soldagem, o arco elétrico e a poça de fusão são protegidos da atmosfera circundante através da formação de uma cortina gasosa proveniente da queima do revestimento e da decomposição de seus constituintes ou por uma escória líquida, de densidade menor que a do metal de solda, que protege a poça de fusão durante a solidificação. Após a soldagem, este líquido protetor se solidifica formando uma escória sólida, a qual deve ser removida [Santos, 1995].

O equipamento utilizado no processo de soldagem consiste em fonte de energia, porta-eletrodos, cabos e conexões, além do eletrodo e do metal base a ser soldado [Santos, 1995], conforme esquematizado na figura 3.1.

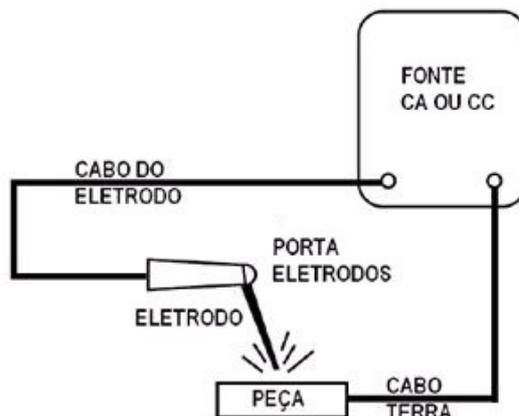


Figura 3.1 – Esquema dos equipamentos para soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido.

### 3.2 Soldagem a arco elétrico por gravidade

A soldagem por gravidade é uma variante da soldagem manual com eletrodo revestido e tem como principal vantagem a alta produtividade pela possibilidade do operador coordenar até quatro tripés ao mesmo tempo. O movimento do eletrodo pode ser realizado pela ação da gravidade ou pela ação de molas [Machado, 1996].

Os eletrodos utilizados têm relativamente grande bitola (5 mm ou maior) e revestimento espesso para formar uma taça na ponta, evitando-se o curto-circuito com o metal base, além de aumentar a rigidez do eletrodo, impedindo-o de oscilar [Machado, 1996].

No equipamento utilizado, construído no LS&TC e mostrado na figura 3.2, o movimento de soldagem é feito pela ação da gravidade.



Figura 3.2 - Equipamento para soldagem por gravidade.

### 3.3 Funções do revestimento do eletrodo

Dentre as diversas características que o revestimento dos eletrodos deve apresentar, as mais importantes são [Meleiro, 1981; Fortes, 2005, e Oliveira, 2009]:

- proteger o arco elétrico e o metal de solda fundido contra o oxigênio e o nitrogênio do ar enquanto o revestimento é transferido através do arco elétrico e enquanto está no estado líquido (a proteção se dá pelos gases gerados pela decomposição do revestimento em alta temperatura);
- estabilizar o arco elétrico, ou seja, facilitar a sua abertura, queimar suavemente mesmo em baixa densidade de corrente de soldagem e conseguir manter o arco, seja longo ou curto;
- possibilitar a adição de elementos de liga ao metal de solda;
- direcionar corretamente o fluxo do arco elétrico para manter a taça e para que as gotas em fusão se dirijam à poça de fusão;
- formar escória no cordão de solda para que essa forneça proteção adicional contra os contaminantes atmosféricos, aja como purificadora e absorva impurezas que são levadas à superfície e sejam ali aprisionadas e reduza a velocidade de solidificação do metal fundido para permitir o escape de gases. A escória também controla o contorno, a uniformidade e a aparência geral do cordão de solda.

### 3.4 Tipos de eletrodo revestido

Os principais tipos de eletrodo revestido são: ácido, básico, celulósico, oxidante, rutilico e básico/rutilico [Machado, 1996].

Os eletrodos do tipo ácido têm um revestimento com altos teores de óxidos de ferro e manganês e sua tensão de trabalho situa-se entre 20 e 40 volts (V) [Machado, 1996]. A escória é ácida, abundante, de aspecto poroso e facilmente destacável [Meleiro, 1981 e Machado, 1996].

Revestimentos básicos têm elevadas quantidades de carbonato de cálcio e fluorita e possui escória básica e pouco abundante; caso os eletrodos sejam devidamente secos, a junta soldada apresenta baixos teores de hidrogênio [Meleiro, 1981 e Machado, 1996], podendo chegar a 5 ml por cada 100 g de metal de solda depositado com secagem e conservação apropriadas [Santos, 1995].

Altos teores de celulose dão nome aos eletrodos do tipo celulósico. Possuem escória pouco abundante e alto teor de hidrogênio depositado no metal de solda [Machado, 1996].

Os oxidantes são constituídos principalmente por óxido de ferro com ou sem óxido de manganês e produzem escória abundante, espessa e facilmente destacável [Meleiro, 1981 e Machado, 1996].

Eletrodos de revestimento rutilico possuem grandes quantidades de rutilo ( $\text{TiO}_2$ ), escória de fácil destaque [Meleiro, 1981 e Machado, 1996]. Devidos às condições de secagem pode apresentar altos teores de hidrogênio [Machado, 1996].

Básico/rutilico é um eletrodo híbrido que apresenta razão de rutilo/carbonato de cálcio entre 1,7 e 3 e suas características dependem da proporção de carbonato na composição do revestimento [Machado, 1996].

### 3.5 Características dos elementos químicos presentes na composição escolhida

O revestimento utilizado para os experimentos é constituído de seis compostos químicos. A relação dos compostos químicos e suas respectivas características relativas à soldagem são descritos a seguir:

- Carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ): Aumenta a estabilidade do arco, a geração de gases, a formação de escória, agente fluxante e diminui a viscosidade. Quando em demasia há dificuldades para operar em corrente alternada (CA) [Machado, 1996]. Empregado como material formador de gases, pois desprende dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono (CO) e vapor d'água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) em altas temperaturas do arco elétrico e como plasticizante para fazer com que o revestimento flua suavemente sob pressão [Fortes, 2005];
- Dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ): Aumenta a formação de escória, a estabilidade do arco e a destacabilidade [Machado, 1996];
- Sílica ( $\text{SiO}_2$ ): Aumenta a formação de escória, aumenta a viscosidade, diminui a desoxidação [Machado, 1996];
- Dióxido de manganês ( $\text{MnO}_2$  – Pirolusita): O manganês é usado como oxidante e atenua a influência nociva do enxofre ao formar MnS aumentando assim a sua forjabilidade; [Colpaert, 1969].
- Silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ): Empregado no revestimento dos eletrodos como aglomerante, ou seja, forma uma massa plástica de material de revestimento capaz de ser extrudada e secada no forno. O revestimento final após a passagem no forno deve apresentar uma dureza tal que mantenha a taça e tenha resistência suficiente para não se fragmentar, trincar ou lascar. Aglomerantes também são utilizados para tornar o revestimento não inflamável e evitar decomposição prematura [Fortes, 2005];
- Filossilicato de magnésio hidratado ( $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ): Talco branco. Age como facilitador de extrusão [Modenesi, 2010]. Também é empregado como formador de escória e estabilizador de arco elétrico [Ponte e Almeida, 2005].

#### 4. METODOLOGIA

Para a obtenção das varetas metálicas (almas), utilizaram-se eletrodos E6013 do fabricante ESAB que tiveram seus revestimentos retirados e em seguida mantidos em estufa para evitar oxidação. Conforme o fabricante, a alma possui diâmetro de 3,25 mm e comprimento de 350 mm.

Os ingredientes do revestimento foram cuidadosamente pesados, misturados a seco (mistura seca) e, então, adicionado o silicato de sódio; o que resulta na mistura úmida (“massa verde”), que foi compactada em um cilindro e alimentada à prensa para ser extrudada sobre as almas – que também são alimentadas através da prensa extrusora [Fortes, 2005].

A composição da primeira mistura foi feita utilizando os elementos químicos indicados na tabela 4.1 com suas respectivas quantidades.

Tabela 4.1 – Elementos e proporções da composição da primeira mistura.

Elemento	Quantidade usada	Porcentagem
$\text{TiO}_2$	424,91 g	47,21% em massa
$\text{SiO}_2$	268,79 g	29,86% em massa
$\text{CaCO}_3$	137,16 g	15,24% em massa
$\text{MnO}_2$	69,14 g	7,68% em massa
Mistura seca	900 g	99,99%
$\text{Na}_2\text{SiO}_3$	180 ml	20% em volume (do total da massa)

Como resultado, a massa verde ficou compactada e aglutinada no cilindro, devido à catalisação do silicato ter sido muito rápida, conforme ilustrado na figura 4.1. O tempo total decorrido desde a adição do silicato à mistura seca até o começo da extrusão foi de 27 minutos, impossibilitando, portanto, a extrusão.



Figura 4.1 - Resultado da tentativa de extrusão da primeira mistura.

Na segunda tentativa foi acrescentado talco branco ( $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ ) aos mesmos elementos utilizados na primeira mistura tendo como objetivo facilitar a extrusão e foi reduzida a quantidade de silicato usada. A composição resultante é mostrada na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Elementos e proporções da composição da segunda mistura.

Elemento	Quantidade usada	Porcentagem (%)
$TiO_2$	426,20 g	42,62% em massa
$SiO_2$	270,14 g	27,014% em massa
$CaCO_3$	137,93 g	13,793% em massa
$MnO_2$	70,07 g	7,007% em massa
$Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$	95,66 g	9,566% em massa
Mistura seca	1000 g	100%
$Na_2SiO_3$	150 ml	15% em volume

Ao contrário da primeira mistura, a segunda pôde ser extrudada e os eletrodos resultantes foram secos em fornos apropriados durante três horas à temperatura de 60 °C, 30 minutos na transição de 60 a 110 °C e finalmente mais 30 minutos à temperatura de 110 °C.

Todos os eletrodos tiveram o revestimento removido das extremidades. Uma delas para permitir o contato elétrico com o porta eletrodos e a outra para possibilitar a ignição do arco elétrico [Meleiro, 1981, e Fortes, 2005].

Os eletrodos revestidos fabricados foram empregados, mediante aplicação manual, utilizando uma fonte de corrente contínua para determinar os valores mínimo e máximo da corrente de soldagem, e suas respectivas tensões elétricas. A corrente contínua foi escolhida por conferir melhor estabilidade ao arco elétrico em relação à corrente alternada e permitir o emprego de uma maior faixa de tipos de eletrodos [Fortes, 2005].

Dois cordões de solda, um para corrente contínua com eletrodo na polaridade positiva (CCEP) e outro em corrente contínua com eletrodo na polaridade negativa (CCEN), foram soldados por gravidade com a corrente de soldagem fixada em 150 A. Destas duas soldagens foram obtidas a velocidade de soldagem e os oscilogramas da corrente de soldagem e da tensão do arco elétrico em função do tempo. Foi escolhido o sistema de soldagem por gravidade devido ao sistema de soldagem automática para eletrodo revestido disponível no LS&TC poder ser ajustado em, no máximo, 30 V de tensão de trabalho. A seleção e utilização do sistema por gravidade têm como objetivo eliminar o efeito do fator habilidade do soldador nos cordões de solda realizados.

Após a soldagem a escória foi retirada e foi realizada a escovação do cordão de solda. A seguir, três corpos de prova foram seccionados transversalmente de cada cordão de solda e

atacados com Nital 2% para posterior análise macroestrutural das dimensões com o auxílio do software ImageJ.

Para a análise da composição química foi preparado um corpo de prova, mediante diversos cordões de solda, depositando um total de nove camadas para que não houvesse diluição no metal de solda depositado. A cada passe feito a escória foi retirada e o cordão de solda escovado. Ao final do processo o corpo de prova foi fresado e lixado na superfície soldada para a obtenção da composição química do metal base e do metal de solda.

A obtenção da quantidade de hidrogênio difusível depositado pelo eletrodo revestido requer um procedimento que deve ser cuidadosamente seguido. Quatro corpos de prova, previamente pesados, são soldados e submetidos a um resfriamento rápido. Aguardam-se, então, alguns minutos para que a escória seja retirada e cada corpo de prova seja colocado em um tubo coletor e lacrado no aparelho que posteriormente medirá a quantidade de hidrogênio presente no metal de solda depositado.

Os corpos de prova permanecem durante seis (6) horas lacrados em uma temperatura de 150 °C em um aquecedor próprio. Após esse período, retiram-se os recipientes do aquecedor e espera-se cerca de uma hora e meia para o seu resfriamento. O aparelho medidor é então calibrado e as medições de hidrogênio são efetuadas. Por fim, os corpos de prova são retirados para logo realizar a pesagem de cada um deles.

A quantidade de hidrogênio difusível indicada no aparelho é relativa à quantidade de metal de solda depositado nos corpos de prova; é necessário convertê-la para ml/100g, unidade usual de comparação.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Baseado na composição química escolhida para a mistura que formará o revestimento, o índice de basicidade (IB) revela o caráter químico do revestimento através da razão entre o somatório das porcentagens dos compostos básicos e o somatório das porcentagens dos compostos ácidos. Quando o IB é inferior a 1,0 o fluxo é considerado ácido, entre 1,0 e 1,5 é considerado neutro e superior a 1,5 é considerado básico [Machado, 1996 e Modenesi, 2010].

O IB encontrado foi de 0,29, valor coerente devido à quantidade de óxidos ácidos ( $\text{TiO}_2$  e  $\text{SiO}_2$ ) ser mais que o triplo da quantidade de básicos ( $\text{CaCO}_3$  e  $\text{MnO}_2$ ), o que caracteriza o eletrodo como sendo de revestimento ácido.

A razão de rutilo/carbonato de cálcio resulta num valor de 3,089, muito pouco acima dos valores de referência [Machado, 1996], ou seja, valor característico de eletrodos rutilico/básicos e, por outro lado, a quantidade de rutilo utilizada indica eletrodo de revestimento rutilico.

Os diâmetros da alma e do revestimento do eletrodo são usados para estimar a relação volumétrica do revestimento (RV), que é o indicador de produtividade que determina a eficiência e a taxa de deposição [Machado, 1996]. Seu valor é expresso por:

$$RV = \frac{D^2 - d^2}{d^2} \quad (5.1)$$

Onde RV é relação volumétrica do revestimento, D é o diâmetro do revestimento (mm) e d é o diâmetro da alma (mm).

Os eletrodos extrudados tiveram 7,8 mm de diâmetro do revestimento, as almas utilizadas 3,25 mm de diâmetro (o que resulta em uma RV de 4,76) e não apresentaram problemas de concentricidade.

O eletrodo revestido fabricado apresentou facilidade para abrir e manter o arco elétrico em correntes de soldagem entre 100 e 150 A, tanto em CCEP quanto CCEN, com a tensão de trabalho, para 140 A, entre 32 e 41 volts para CCEP e entre 33 e 47 volts para CCEN. Fora desse intervalo de corrente a soldagem mostrou-se difícil ou impraticável.

Após a soldagem a arco elétrico por gravidade, o cordão de solda teve sua escória retirada e foi escovado para que a análise visual da sua qualidade superficial pudesse ser feita. A escória retirada era abundante, porosa e de fácil remoção. O cordão de solda apresentou bom aspecto visual sem inclusões de escória, porosidades ou trincas de solidificação, conforme mostrado nas figuras 5.1 e 5.2.



Figura 5.1 – Aspecto do cordão de solda realizado com CCEP.



Figura 5.2 – Aspecto do cordão de solda realizado com CCEN.

Esses cordões tiveram os seus comprimentos e os respectivos tempos de soldagem medidos para que a velocidade média de soldagem pudesse ser calculada; seus valores constam na tabela 5.1. Os oscilogramas da corrente e da tensão dessas soldagens foram utilizados para a obtenção dos seus valores médios em função da CCEP e CCEN, conforme mostrado na figura 5.3.

Tabela 5.1 - Comprimentos dos cordões de solda e tempos de soldagem.

Tipo de alimentação	Tempo de soldagem	Comprimento do cordão de solda	Velocidade média de solda
CCEP	36,85 s	165 mm	4,47 mm/s
CCEN	33,25 s	185 mm	5,56 mm/s

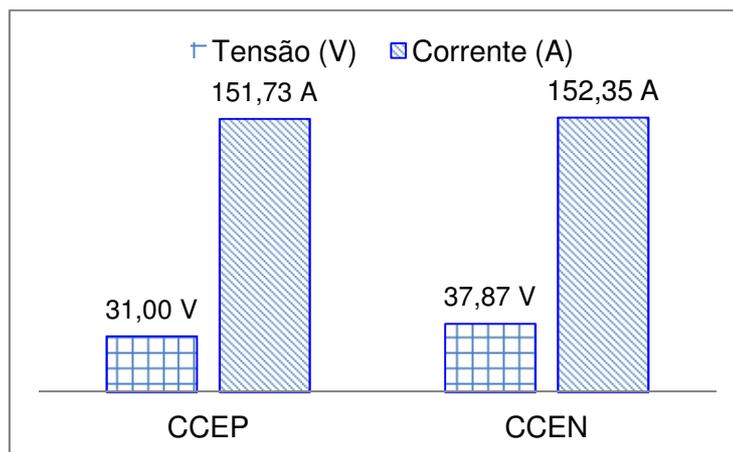


Figura 5.3 - Valores médios da corrente e tensão de soldagem para as CCEP e CCEN.

A energia nominal de soldagem, quantidade de calor imposta durante o processo de soldagem, representa a energia fornecida pelo arco elétrico por comprimento do cordão de solda [Maia, 2005] e é expressa por [Machado, 1996, e Maia, 2005]:

$$E_n = (UI)/V \quad (5.2)$$

Onde  $E_n$  é a energia nominal de soldagem (J/mm),  $U$  é a tensão de soldagem (V),  $I$  é corrente de soldagem (A) e  $V$  é a velocidade de soldagem (mm/s).

Quanto maior a energia nominal de soldagem empregada no processo, menor a taxa de solidificação do metal de solda, ou seja, maior é o tempo disponível para os gases escaparem para a atmosfera sem serem aprisionados pela frente de solidificação [Maia, 2005].

Dessa forma, aumentos na tensão e na corrente do arco e redução na velocidade de soldagem aumentam a energia nominal de soldagem, ou seja, favorecem o escape dos gases [Maia, 2005].

Como para cada processo e condição de soldagem há um rendimento térmico ( $r$ ), resultante da razão entre a quantidade de calor transferida para a peça e o total gerado pelo arco, deve-se calcular a energia líquida para soldagem a arco elétrico ( $E$ ). Essa energia é utilizada para fundir somente o material base ou o material base e o consumível [Machado, 1996]. O valor de  $r$  é tabelado e vale  $0,75 \pm 0,10$  pra eletrodo revestido. Neste trabalho terá seu valor fixado em  $r = 0,75$ .

$$E = rE_n \quad (5.3)$$

Onde  $E$  é a energia líquida de soldagem (J/mm),  $r$  é o rendimento térmico e  $E_n$  é a energia nominal de soldagem (J/mm).

Na figura 5.4 são plotados os valores calculados das energias nominais e líquidas para CCEP e CCEN baseados nos dados dos parâmetros principais obtidos durante a realização do cordão de solda.

Três corpos de prova para cada variação de conexão de corrente contínua; P1, P2 e P3 para CCEP e N1, N2 e N3 para CCEN foram extraídos da seção transversal do cordão de solda. Estes foram devidamente lixados, polidos e atacados com Nital 2%.

As imagens obtidas para cada corpo de prova foram analisadas pelo software ImageJ. Mediante esse software é possível de maneira prática realizar as medições dos parâmetros da geometria do cordão de solda e das áreas desejadas.

Os cordões de solda foram avaliados mediante a inspeção visual (“olho nu”) e não apresentaram mordedura, depósito insuficiente ou sobreposição de metal de solda. Ou seja, o metal base foi apropriadamente fundido, a mistura de metal de solda do eletrodo e de metal

base tiveram uma boa penetração na junta soldada e a margem (ou pé) do cordão de solda imergiu suavemente no material base [Oliveira, 2009].

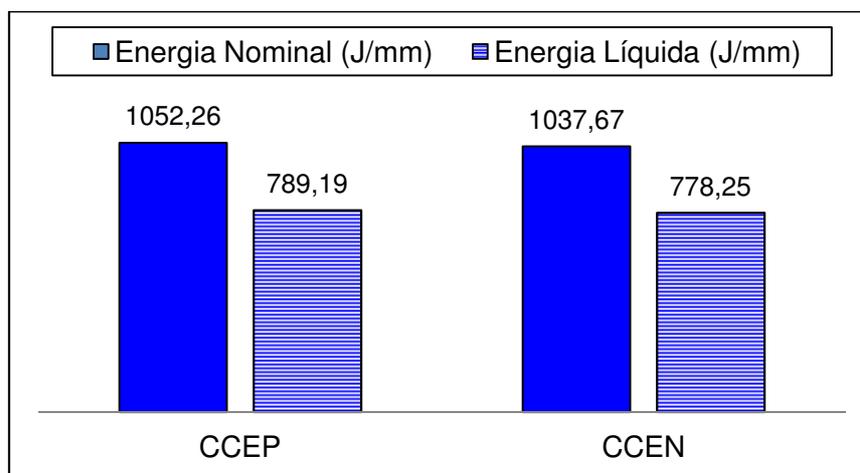


Figura 5.4 - Valores médios da energia nominal e da energia líquida de soldagem para CCEP e CCEN.

Os parâmetros da geometria do cordão de solda considerados para a análise são: penetração ( $p$ ), largura ( $b$ ), altura do reforço ( $r$ ), área fundida do metal base ( $S_p$ ) e área de reforço ( $S_r$ ). Estes parâmetros estão ilustrados na figura 5.5 da macrografia do corpo de prova N2 (realizado em CCEN) e os resultados para todos os corpos de prova encontram-se nas figuras 5.6 e 5.7.

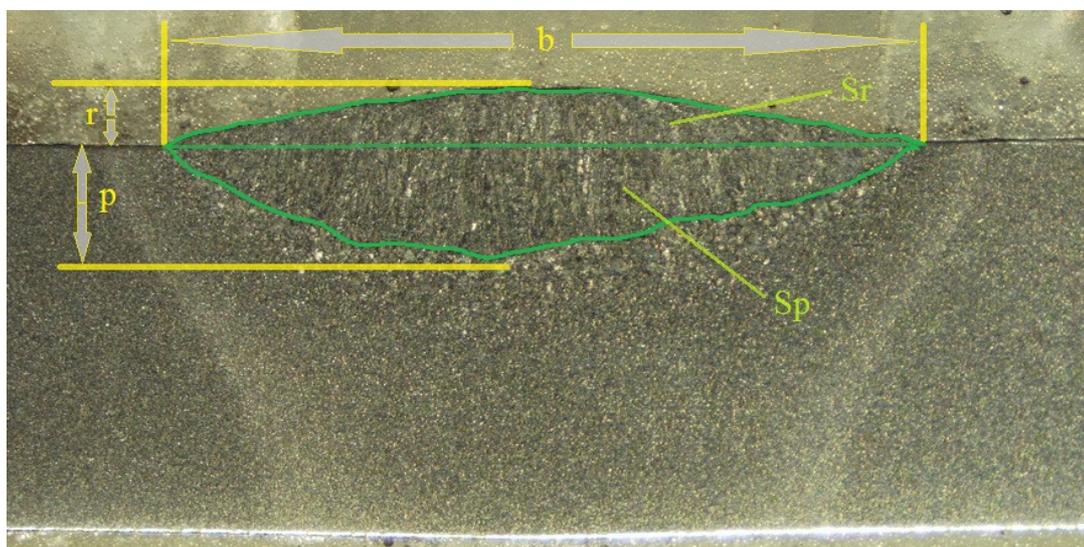


Figura 5.5 - Aspecto da seção transversal de um cordão de solda com os parâmetros da geometria do cordão.

Os valores médios da figura 5.6 indicam que a penetração para CCEP (1,823 mm) é maior que a penetração para CCEN (1,687 mm). Segundo a literatura [Machado, 1996, e Fortes, 2005], verifica-se que o cordão de solda obtido por CCEP apresenta maior penetração que a realizada por CCEN.

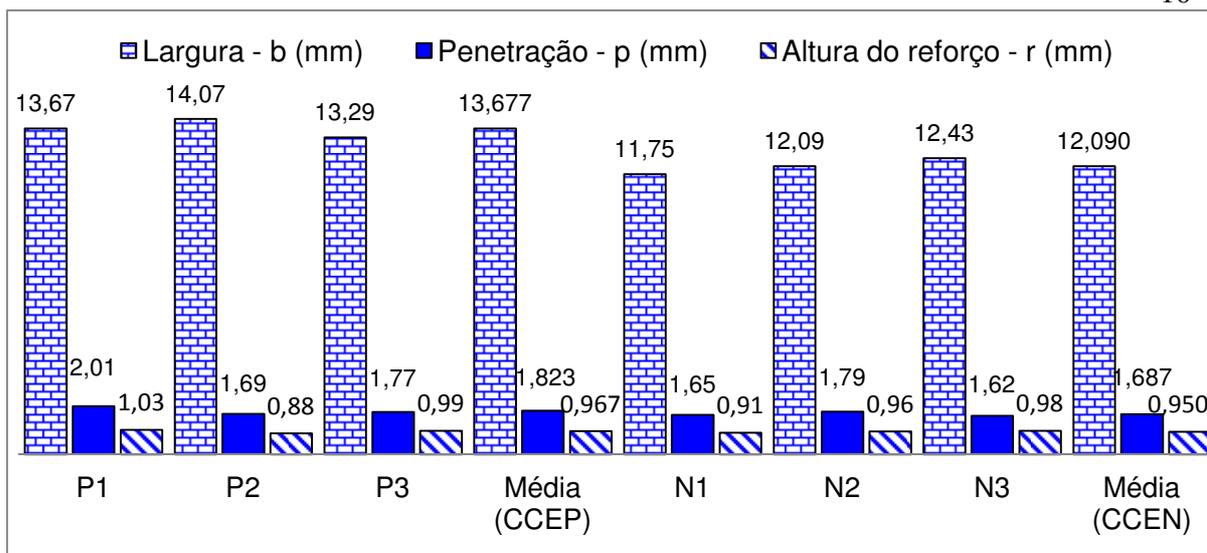


Figura 5.6 - Valores medidos dos parâmetros do cordão de solda e médios para CCEP e CCEN.

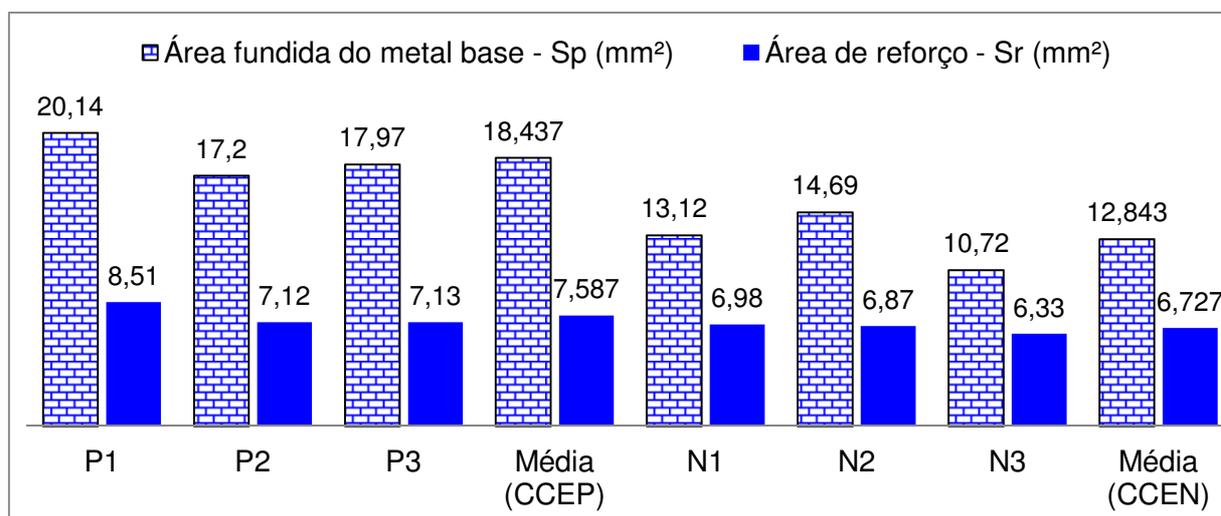


Figura 5.7 - Valores medidos das áreas fundida do metal base e do reforço do cordão de solda e médios para CCEP e CCEN.

Uma vez determinadas as áreas fundidas do metal base e a do reforço do cordão de solda podem ser calculadas a convexidade do cordão (IC) e a diluição (D) [Leonello, 2005]:

$$IC = \frac{r}{b} 100 \quad (5.4)$$

Onde IC é a convexidade do cordão de solda (%), r é a altura do reforço do cordão de solda (mm) e b é largura do cordão de solda (mm), como se mostra na figura 5.8.

$$D = \frac{Sp}{Sp + Sr} 100 \quad (5.5)$$

Onde D é a diluição (%), Sp é a área fundida do metal base (mm²) e Sr é a área de reforço do cordão de solda (mm²), como se mostra na figura 5.9.

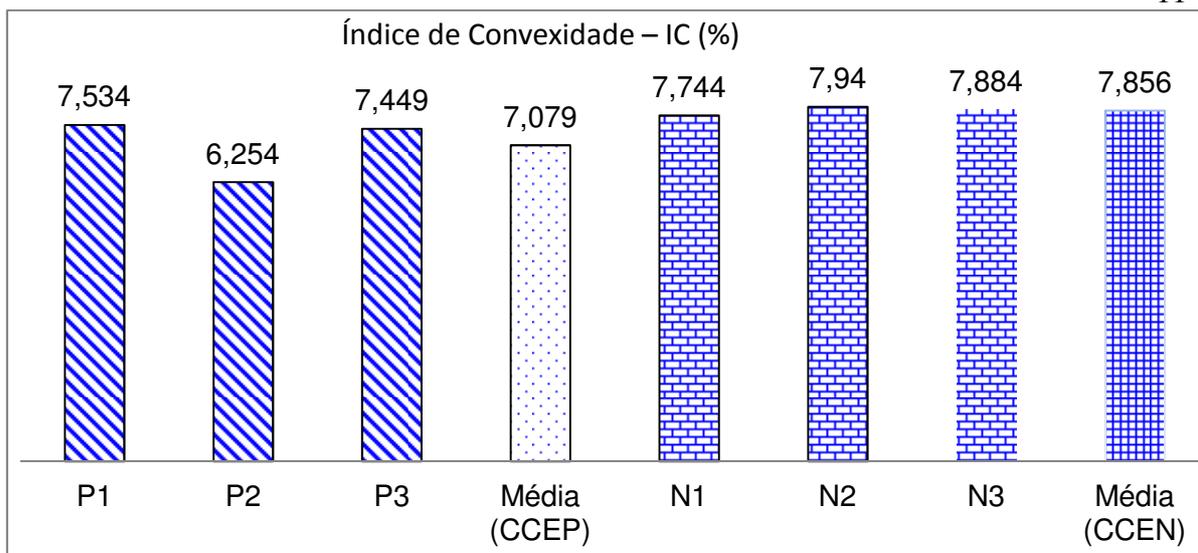


Figura 5.8 - Valores obtidos do índice de convexidade (IC) para os corpos de prova P1, P2, P3 e valor médio para CCEP e N1, N2, N3 e valor médio para CCEN.

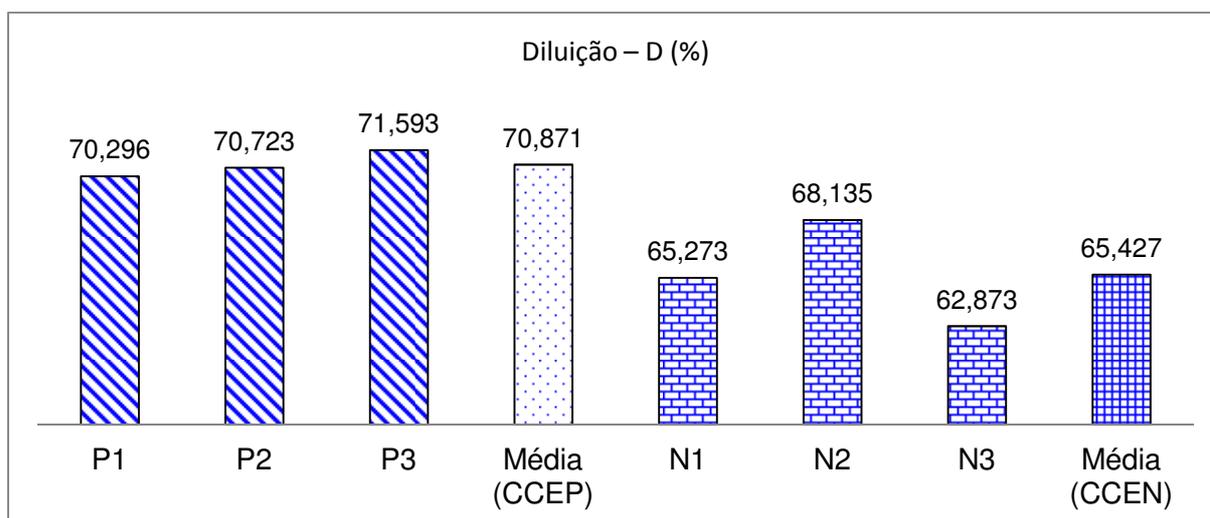


Figura 5.9 - Valores da diluição (D) para os corpos de prova P1, P2, P3 e valor médio para CCEP e N1, N2, N3 e valor médio para CCEN.

A análise da composição química foi realizada no LAMEF e teve como resultado os elementos descritos na tabela 5.2 bem como suas respectivas porcentagens presentes no metal base e no metal de solda.

A alma dos eletrodos para os aços ao carbono e baixa liga, é geralmente produzida com aço efervescente (não desoxidado) de baixo carbono, possuindo uma típica composição química de 0,10% C; 0,45% Mn; 0,01% Si; 0,03% S e 0,02% P [Machado, 1996].

Segundo os resultados da composição química, nos compostos mais relevantes (maiores que 0,1%), houve diminuição dos teores de C, Si e Mn e aumento na quantidade de Fe. O metal de solda apresentou teores de enxofre (tolerável até 0,05%), fósforo (abaixo de 0,1%) e silício (impureza normal em aços quando entre 0,05 e 0,3%) satisfatórios [Colpaert, 1969].

A figura A.1 do apêndice ilustra a micrografia da transição do metal base para o metal de solda. Percebe-se o aumento da zona ferrítica (parte clara) no metal de solda.

Tabela 5.2 – Resultado da análise química do metal base e do metal de solda depositado pelo eletrodo fabricado (porcentagem em massa).

Elemento	Metal base	Metal de solda depositado
C	0,175	0,0303
Si	0,224	0,190
Mn	0,849	0,0889
P	0,0189	0,0433
S	0,0065	0,0304
Cr	0,0145	<0,001
Al	0,0311	<0,001
Cu	<0,01	0,0192
Nb	0,0011	<0,001
Ti	0,0026	0,007
B	<0,0001	0,0002
Fe	98,7	99,6

A redução nos teores de Si, Al e Mn pode ser explicada pela maior afinidade química que esses elementos possuem com o oxigênio e o nitrogênio em relação à afinidade do ferro, ou seja, reagem no aço com esses gases para formar seus próprios óxidos e nitretos removendo, assim, esses gases das soluções sólida e líquida no ferro [Boniszewski, 1992].

O elemento Ti, apesar de também maior afinidade química com o oxigênio e o nitrogênio que o ferro, não apresentou redução devido à grande quantidade desse elemento no revestimento.

Adicionalmente Si, Al e Ti capturam oxigênio suficiente para eliminar as porosidades causadas por CO. Enquanto que o Al e o Ti também tem afinidade grande o bastante pelo nitrogênio para prevenir as porosidades causadas pelo nitrogênio [Boniszewski, 1992]. O enxofre combina-se com o manganês e com o ferro formando sulfuretos de manganês e de ferro, respectivamente, tendo maior afinidade pelo manganês [Colpaert, 1969], sendo, assim, a provável causa do grande aumento de S e conseqüente redução de Mn.

O eletrodo utilizado possui muitas das características dadas aos eletrodos do tipo ácido: relativa boa aparência do metal de solda; tensão de trabalho entre 20 e 40 V; baixos teores de carbono e fósforo e escória abundante, facilmente destacável e de aspecto poroso [Machado, 1996]. Contudo, baixos teores de enxofre [Machado, 1996] e aumento de silício no metal de solda [Modenesi, 2010], não foram encontrados. A análise química realizada indicou, inclusive, comportamentos contrários aos descritos para os eletrodos do tipo ácido: altos teores de enxofre e redução de silício.

O cordão de solda para a determinação do conteúdo de hidrogênio difusível no metal de solda depositado foi realizado com CCEN e uma corrente de soldagem de 110 A. Para a medição da quantidade de hidrogênio difusível no metal de solda foi utilizado o aparelho HDM Analyzer da marca Oerlikon, disponível no LS&TC. Os valores obtidos estão plotados na figura 5.10.

O teor de hidrogênio difusível médio medido foi de 43,525 ml/100g, conforme mostrado na figura 5.10. Esse valor é definido como alto, ou seja, acima de 15ml/100g [Fortes, 2005], o que indica prováveis trincas na junta soldada se esta for realizada em microestruturas frágeis em conjunto com tensões aplicadas à junta devido aos aços de alta dureza serem mais suscetíveis à fissuração causada pelo hidrogênio que os de baixa dureza pela sua menor ductilidade, tenacidade e reduzida capacidade de acomodação das tensões na região de solda [Modenesi, 2010].

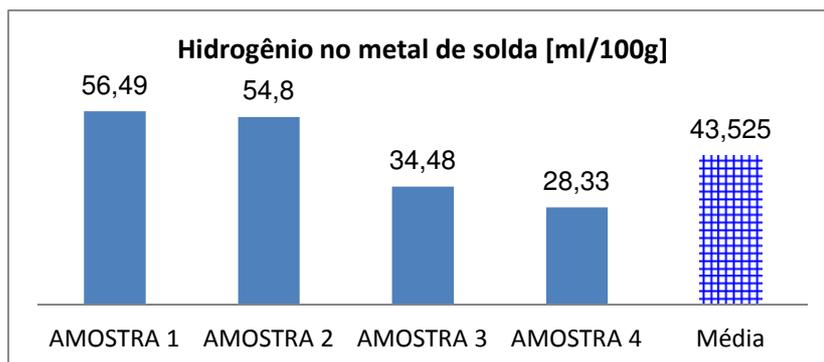


Figura 5.10 - Valores do hidrogênio difusível em cada uma das amostras e o valor médio para CCEN.

## 6. CONCLUSÕES

Os elementos utilizados para a composição do eletrodo revestido utilizado são todos de fácil obtenção no mercado e de baixo custo, conforme proposto.

As tensões e as correntes de soldagem (ainda que esta seja considerada elevada) utilizadas para a soldagem do eletrodo extrudado são satisfatórias e viáveis.

A pós-soldagem do revestimento apresentou um bom aspecto visual. No cordão de solda não foram constatadas trincas superficiais, porosidades e inclusões de escória aparentes. A escória formada foi abundante e de fácil destaque, com aparência porosa.

A geometria do cordão de solda foi facilmente caracterizada, sendo possível a obtenção dos seus fatores.

A quantidade de hidrogênio difusível encontrada é considerada alta (43,525 ml/100 g de metal de solda depositado).

Assim, a formulação utilizada para o revestimento demonstra ser promissora para o estudo de futuras adições de elementos de liga na composição do eletrodo revestido produzido para este trabalho.

Como sugestão para trabalhos futuros, indica-se o efeito da adição de elementos de liga a esse revestimento e/ou a análise das propriedades mecânicas da junta soldada do revestimento utilizado (não avaliadas no presente trabalho) para uma melhor caracterização do revestimento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Boniszewski, T. - **“Self-shielded arc welding”**, Cambridge, 1992.

Colpaert, H. - **“Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns”**, São Paulo, 1969, reimpressão de 1983.

Fortes, C. - **“Eletrodos Revestidos OK”**, <http://www.esab.com.br/>, 2005. Acessado em 30/09/2011

Leonello Filho, A. - **“Análise da influência dos parâmetros do processo de soldagem com eletrodos revestidos na estabilidade do arco e características geométricas do cordão”**, Itajubá, Dissertação de mestrado, UNIFEI, 2005.

Machado, I.G. - **“Soldagem & Técnicas Conexas: Processos”**, Porto Alegre, Editado pelo autor, 1996.

Maia, I.G. - **“Efeito da Camada de Nitretos na Porosidade em Soldas de Eixos Automotivos”**, Campinas, Dissertação de mestrado, UNICAMP, 2005.

Meleiro, J.C. - **“Soldagem a arco com eletrodos revestidos”**, São Paulo, Associação brasileira de metais, Curso de soldagem, 17ª edição, 1981.

Modenesi, P.J. - **“Soldabilidade dos aços transformáveis”**, Belo Horizonte, UFMG, 2010.

Oliveira, V.V. - **“Apostila de Soldagem”**, <http://www.joinville.ifsc.edu.br/>. Última modificação em 21/09/2009. Acessado em 29/09/2011

Pontes, I. F.; Almeida, S.L.M. - **“Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações”**, Capítulo 29: Talco, Rio de Janeiro, CETEM, 2005.

Santos, M.G. - **“Metodologia para Comparação entre Fonte Inversora e Eletromagnética para Eletrodos Revestidos”**, Uberlândia, Dissertação de mestrado, UFU, 1995.

Welding Handbook, 8ª Ed. Vol 2 - Welding Processes, American Welding Society, Miami, 1991.

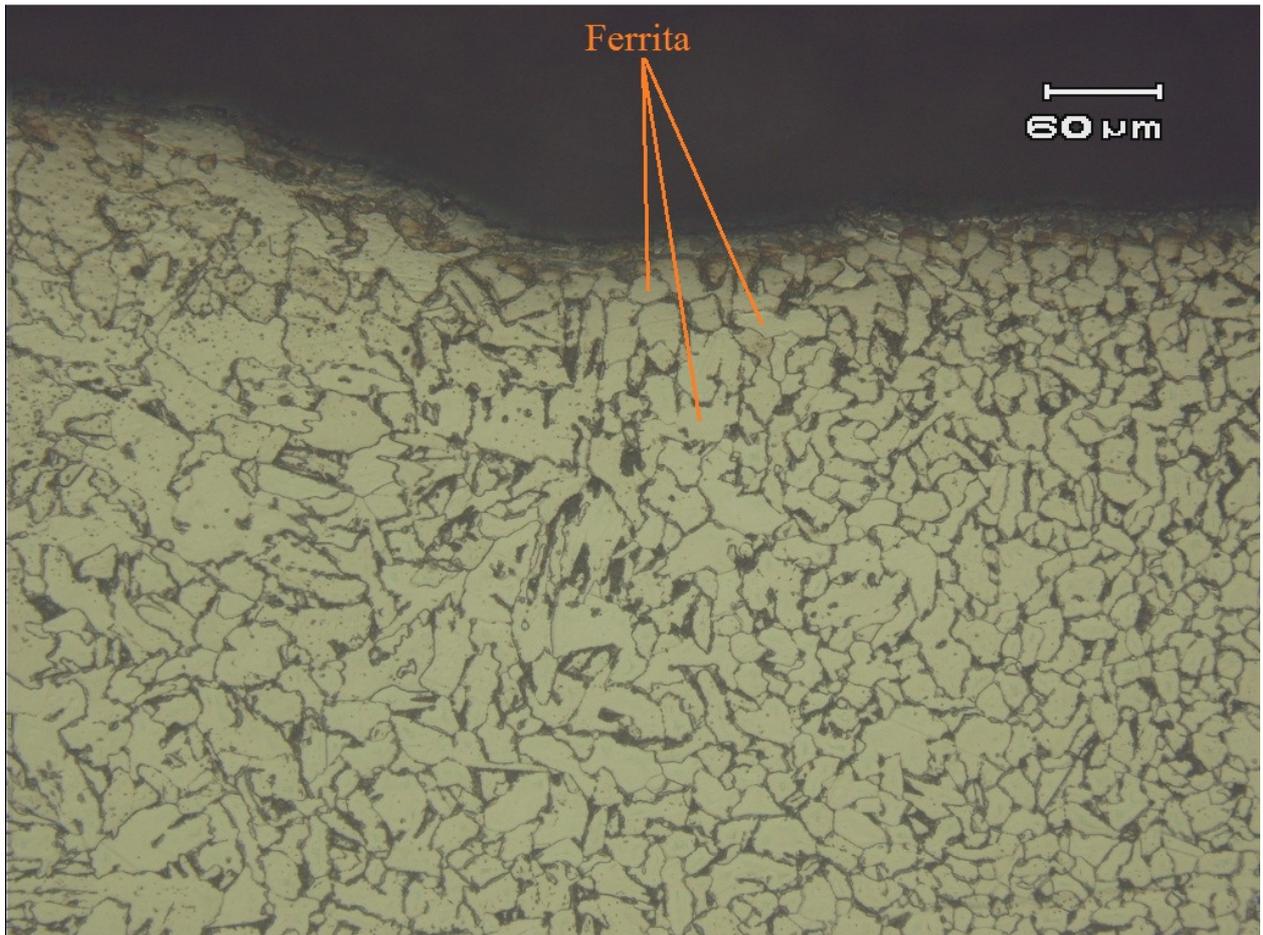


Figura A.1 - Microestrutura do corpo de prova N2 da seção transversal junto à margem do cordão de solda. Exemplo de zona ferrítica em destaque.