



Tema: Soldagem

## REDUÇÃO DO CUSTO DE TRANSFORMAÇÃO DA BQD PELA ALTERAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDA A TOPO POR CENTELHAMENTO\*

*Douglas Luciano da Silva Oliveira<sup>1</sup>*

*Gabriel Santos Cunha<sup>2</sup>*

*Yuri Soares Negreiros<sup>3</sup>*

*João Carlos Santos Delfino<sup>4</sup>*

### Resumo

Em uma linha de decapagem contínua, o tempo de parada da entrada para realização da solda é um dos fatores que mais afeta a produtividade. Estratificando-se o tempo total dessa parada, parte significativa é composta pelo tempo de centelhamento, que é um dos parâmetros fundamentais da soldagem a topo por centelhamento. Adicionalmente, a energia elétrica e o gás natural, consumidos durante o processo de soldagem, contribuem para onerar o custo de transformação da BQD. A fim de reduzir esse tempo e os custos de transformação, avaliou-se, através de análise metalográfica, ensaios de embutimento e dureza, a qualidade de juntas soldas com tempos reduzidos e sem o uso do sistema de depleção de oxigênio, para aços de baixo carbono, de acordo com referências da literatura. Com base nos resultados obtidos, foi possível reduzir o tempo médio de solda em 5s em materiais com espessuras superiores a 2,50mm e eliminar a necessidade do uso de gás natural em todos os aços da GRADE 0, o que representa em torno de 76% das bobinas produzidas nas LDCs.

**Palavras-chave:** Soldagem a topo por centelhamento; Produtividade; Decapagem.

### REDUCING OF HOT ROLLED PICKLED COIL COSTS BY CHANGING IN FLASH WELDING PARAMETERS

#### Abstract

In a continuous pickling line, the entry down time is one of the constraints in productivity. Stratifying the total down time, significant part consists in flashing time, which is one of the fundamental parameters of Flash Butt Welding. Furthermore, electricity and natural gas consumed during welding process, contribute to raise process costs. In order to reduce time and process costs was evaluated through metallographic analysis, Olsen cup and hardness test, the quality of welds joints with diminished time and without oxygen depletion system for low-carbon steels according to the literature. Based on achieved results, it was possible to reduce the average weld time in 5s for materials with thicknesses greater than 2.50 mm and eliminate the need of natural gas use in all GRADE 0 steels, which represents around 76% of coils processed in the CPLs.

**Keywords:** Flash butt welding; Productivity; Pickling.

<sup>1</sup> *Engenheiro de Materiais, USP, Mestre em Ciências, Engenheiro Especialista, GDA, CSN, Volta Redonda, RJ, Brasil.*

<sup>2</sup> *Graduando em Engenharia Metalúrgica, UFF, Estagiário de Engenharia, GDA, CSN, Volta Redonda, RJ, Brasil.*

<sup>3</sup> *Graduando em Engenharia Metalúrgica, UFCE, Estagiário de Engenharia, GDA, CSN, Volta Redonda, RJ, Brasil.*

<sup>4</sup> *Técnico de Laboratório, GGPS, CSN, Volta Redonda, RJ, Brasil.*

\* *Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.*



## 1 INTRODUÇÃO

A soldagem a topo por centelhamento (*Flash Butt Welding* - FBW) é um processo de soldagem por resistência que apresenta diversas vantagens, tais como [1]: alta produtividade, preparação rápida e simplicidade de operação, não demandando mão de obra altamente qualificada. Este processo é utilizado em diversos segmentos da indústria, podendo se destacar principalmente nos setores automotivo, petroquímico e siderúrgico.

Na siderurgia, o processo FBW é amplamente utilizado em linhas de decapagem, a fim de se obter um processo contínuo através da união das extremidades das bobinas laminadas a quente na seção de entrada.

Os parâmetros de soldagem devem ser bem especificados e assertivos, pois, à eles estão atrelados a confiabilidade da junta soldada [2], além de grande influência sobre os indicadores de disponibilidade e produtividade das linhas. Isto significa que os parâmetros configurados devem estar de acordo com a composição química e a dimensão da chapa, de forma que a solda resista tanto as tensões trativas, compressivas e flexões nas linhas de decapagem, quanto as deformações impostas na laminação à frio. Por outro lado, essa otimização também deve levar em consideração os fatores de custo atrelados à operação, a fim de aumentar a competitividade do produto final no mercado.

Com base em informações disponíveis na literatura, identificou-se a oportunidade de revisar os parâmetros de solda dos aços baixo carbono das Linhas de Decapagem Contínuas (LDCs) 3 e 4, objetivando reduzir o custo e o tempo das soldas realizadas [1-3].

### 1.1 OBJETIVO

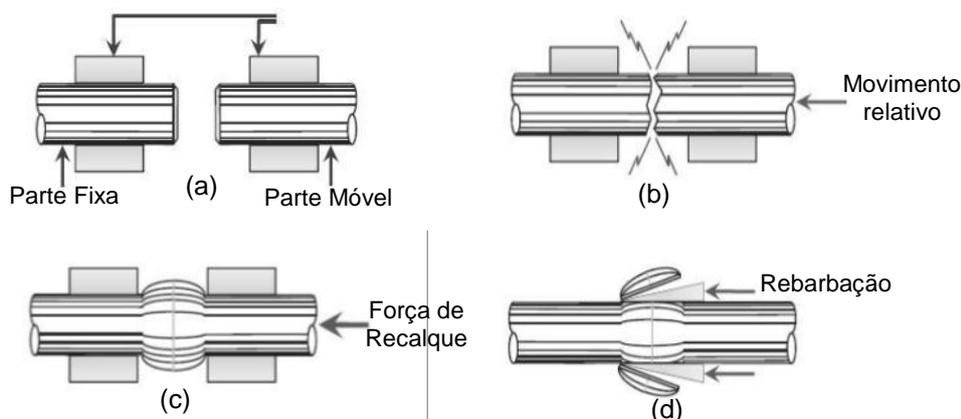
Promover a redução do custo de transformação da BQD pela diminuição do tempo de centelhamento e inibição do gás de proteção, mantendo as propriedades físicas, químicas e metalúrgicas adequadas à confiabilidade e segurança da solda.

### 1.2 Revisão Bibliográfica

Na soldagem a topo por centelhamento [4-5] as peças a serem soldadas são posicionadas com as extremidades muito próximas, sem, no entanto, se tocarem. Então, uma corrente elétrica é acionada e uma das peças é colocada em movimento contra a outra de modo a se aproximarem com uma velocidade controlada. Este movimento de aproximação contínua e estabelece um fluxo de corrente, promovendo um aquecimento resistivo das superfícies das peças até que o ponto de fusão, inicialmente em poucos pontos de contato, do material seja alcançado. O volume de material fundido é então expelido para fora da região da solda através de forças magnéticas superficiais criadas pelo fluxo de corrente, com a consequente formação de pequenas partes incandescentes de material sob a forma de centelhas. Por ação do centelhamento, ocorre a vaporização dos pontos em contato, permitindo, desta forma, que novos pontos entrem em contato e o centelhamento se espalhe ao longo de toda a superfície da junta. Após determinado tempo de centelhamento, quando todas as superfícies a serem unidas estiverem suficiente aquecidas, inicia-se a força de recalque, onde as peças são rapidamente pressionadas uma contra a outra, sofrendo considerável deformação plástica nas

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

superfícies da junta o que leva a formação da solda<sup>2-5</sup>. Uma ilustração desse processo está indicada na Figura 1.



**Figura 1.** Etapas básicas para soldagem FBW. (a) Posicionamento inicial de fixação das peças, (b) Após a energia elétrica ser acionada, as peças são aproximadas com uma  $v$ , ocorrendo o centelhamento, (c) Aplicação da força de recalque para a formação da solda, (d) Rebarbação.  
Fonte: Kim [6].

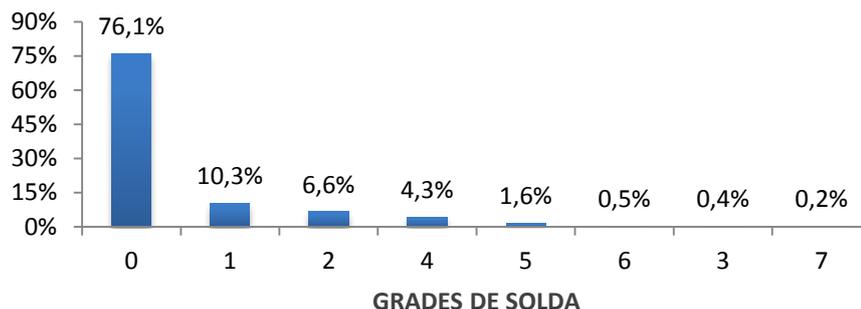
Adicionalmente, Ziemian [7] e Arabaci [8], demonstram que a qualidade desta junta soldada é diretamente influenciada pelos parâmetros de soldagem. O processo FBW possui uma complexa gama de parâmetros [2] a serem controlados de acordo com as especificações requeridas pela junta com o objetivo de garantir as propriedades mecânicas e evitar eventuais distorções, tensões residuais ou porosidade. Este controle é complexo devido as sucessivas alterações metalúrgicas que ocorrem durante e após o centelhamento ocasionado pelos diferentes níveis de calor entre a interface de solda, a ZTA – Zona Termicamente Afetada – e o metal base [9]. Da mesma forma, a composição química do metal base também exerce influência sobre os parâmetros, impactando na qualidade da junta [10].

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Seleção do Material

Os materiais processados nas LDCs da CSN são agrupados de acordo com os parâmetros estabelecidos de soldagem em oito grupos chamados “grades de solda”. A triagem dos materiais para análise foi realizada tendo como critério de seleção a menor sensibilidade à variação dos parâmetros (melhor soldabilidade) e o maior volume de produção, visando obter um maior impacto no resultado global das LDCs. Através da apuração dos dados de produção, constatou-se que os materiais presentes na “grade 0”, de acordo com a Figura 2, atenderiam este preceito.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



**Figura 2.** Gráfico com as parcelas de volume de produção (%ton/ton) das grades de solda processadas nas LDCs. Fonte: CSN, Dados do *Impromptu* 2012

A seleção das espessuras seguiu a mesma premissa sendo designadas preliminarmente as espessuras de 2,25mm, 3,00mm e 4,25mm para análise. Posteriormente se fez necessário o uso de uma amostragem de 2,00mm para realização de um planejamento de experimento – *Design of Experiment* (DOE).

## 2.2 METODOLOGIA

À luz de trabalhos como *Resistance Welding Manual*<sup>3</sup> (RWMA), *Welding Handbook* [1] (WH) e informações de desenhos do fabricante para uma máquina similar às utilizadas nas LDCs 3 e 4, foi possível estabelecer um comparativo entre o cenário atual que se encontram as linhas de decapagem da CSN em relação aos tempos de centelhamento sugeridos por estes trabalhos conforme Tabela 1.

**Tabela 1.** Parâmetro Tempo de Centelhamento em segundos de acordo com cada faixa de espessura.

Faixas de Espessura	Parâmetro Atual	Fabricante	WH	RWMA
1,27 - 1,50	8	6	3,25	7,5
1,51 - 1,75	9	6	4	8
1,78 - 2,01	10	7	5	8,5
2,02 - 2,26	12	8	6	9
2,27 - 2,51	13	8	7	9
2,52 - 3,02	14	8	9	9,5
3,03 - 3,53	16	9	11	10
3,54 - 4,04	18	10	13	10
4,05 - 4,55	21	11	15	11
4,56 - 5,05	23	12	17	12

Adotando uma postura mais conservadora, decidiu-se modificar o parâmetro atual conforme a Tabela 2, incluindo a retirada do gás de proteção para se realizar os testes nas linhas de produção.

A justificativa pela decisão em não se utilizar o gás de proteção decorreu de que conceitualmente, o sistema de depleção de oxigênio com queima de gás natural foi desenvolvido para aprimorar solda em aços microligados e aços com teor de silício elevado [11]. Além disso, antes do modernização da máquina de solda em 2001, este insumo não era utilizado no processo de soldagem e bons resultados em aços baixo carbono já eram alcançados. Desta forma optou-se em analisar o impacto deste fator na qualidade da solda.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

**Tabela 2.** Tabela de referência para alteração do Parâmetro

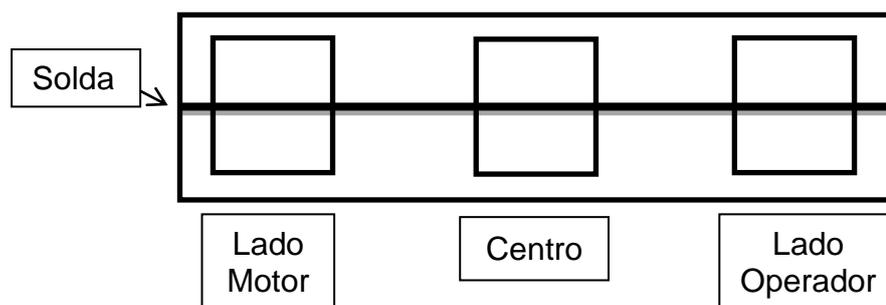
Faixas de Espessura (mm)	1,27 -	1,51 -	1,78 -	2,02 -	2,27 -	2,52 -	3,03 -	3,54 -	4,05 -	4,56 -
	1,50	1,75	2,01	2,26	2,51	3,02	3,53	4,04	4,55	5,05
Parâmetro Atual (Com Gás Natural)	8	9	10	12	13	14	16	18	21	23
Parâmetro Proposto (Sem Gás Natural)	6	6	7	8	8	9	11	13	15	18

## 2.3 Ensaios Laboratoriais

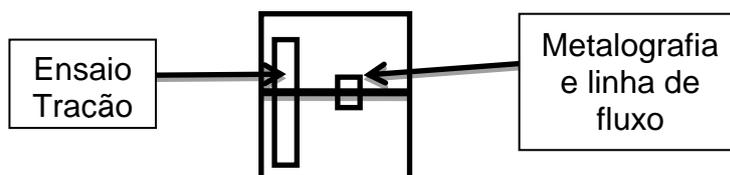
Foram realizados ensaios de embutimento e dureza além de análises metalográficas e de linhas de fluxo.

Para a realização dos ensaios, foram retiradas 4 amostras, sendo 2 com o parâmetro atual e 2 com o parâmetro proposto. Em cada par de amostras foi realizado ensaio de embutimento em uma e na outra foram realizado os demais testes.

Foi feita a divisão em três seções, conforme a Figura 3, com intuito em avaliar quaisquer alterações que viessem a ocorrer ao longo da solda, para entender como a solda se comporta ao longo da amostra.

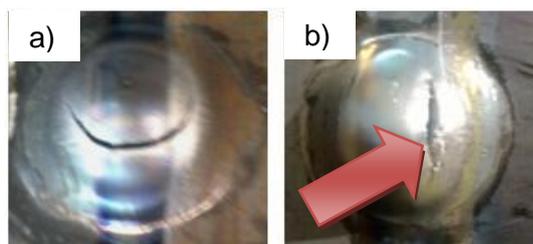
**Figura 3.** Esquema de corte de amostras para realização de ensaios

Para cada seção, o esquema de confecção de corpos de prova está descrito na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Figura 4.

**Figura 4.** Confecção dos corpos de prova para realização de ensaios.

### 2.3.1 Ensaios mecânicos

Preliminarmente, foram realizados os ensaios de embutimento logo após o processo de soldagem nas LDCs, onde como forma de avaliação adotou-se o seguinte critério (ver Figura 5):



**Figura 5.** (a) Ruptura no sentido perimetral - APROVADO (b) Ruptura no sentido radial - REPROVADO

- Sem ruptura ou ocorrência de ruptura perimetral – APROVADO.
- Ocorrência de ruptura no sentido radial – REPROVADO.

A adoção deste método garante de forma preliminar, mesmo que de maneira não conclusiva, a avaliação da região da solda em relação ao metal base - MB.

Os ensaios de dureza Vickers seguiram as normas ASTM E 92 – 828<sup>12</sup> no qual foram analisados ao todo 45 medições por amostra, sendo realizadas 15 medidas em cada região sendo 10 na região de solda e 5 no metal base.

Para tratamento dos resultados utilizou-se o *software* “Minitab” para a realização de teste de hipóteses. Assim, pode se definir estatisticamente se havia, ou não, diferença significativa nos valores de dureza entre as amostras.

### 2.3.2 Ensaios metalográficos

Para estes ensaios, o processo de lixamento foi realizado em politrizes giratórias utilizando lixas d’águas de granulometria de 100, 400 e 1200. Após este procedimento, as amostras foram submetidas a um polimento em pasta de diamante de 3 $\mu$ m e posteriormente em alumina 0,05 $\mu$ m. Na realização do ataque químico, foi adotado nital 3%.

Na realização dos ensaios de linhas de fluxo, foram utilizados os mesmos procedimentos, sendo que o ataque químico utilizado foi um reagente composto por 200ml de água destilada, 1g de cloreto férrico, 2,9g de ácido pícrico e 20ml de detergente neutro. Para a preparação deste reagente, se misturou manualmente todos os compostos químicos até a completa dissolução dos compostos para então realizar um aquecimento até uma temperatura de 80°C e, em seguida, resfriá-lo até 50°C, para neste momento imergir a amostra na solução por aproximadamente 30 segundos.

### 2.3.3 Planejamento de experimento

No decorrer do projeto, em posse de alguns resultados prévios não satisfatórios apresentados pelas alterações propostas à amostra de 2,25mm, optou-se por uma nova bateria de testes para a realização de um *DOE*, a fim de identificar a significância das variáveis e suas interações.

A espessura selecionada para representar a faixa <2,52mm foi a de 2,00mm, na qual foram realizados experimentos multivariados em sequência aleatória nos fatores “utilização do gás” e “tempo de centelhamento”, de acordo com a Tabela 3.

**Tabela 3.** Amostragem adotada para o DOE

Ordem	1	2	3	4	5	6	7	8
Gás	Sem	Sem	Com	Com	Com	Sem	Sem	Com
Tempo de Centelhamento	7	7	10	10	7	10	10	7

As variáveis resposta da análise por DOE foram obtidas a partir da realização de ensaios de embutimento controlados nas soldas, onde foi mensurada a profundidade

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

de penetração, a carga máxima e o percentual de aprovação de cada combinação testada.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

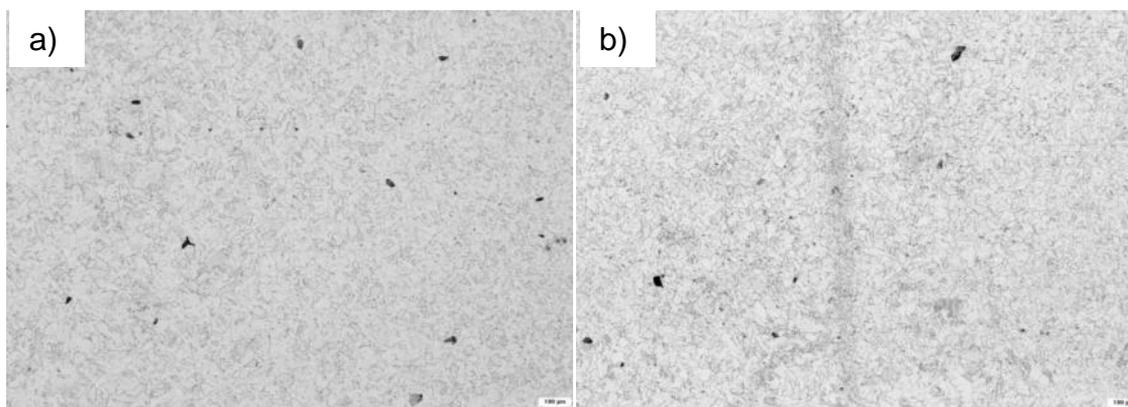
Os resultados obtidos com os ensaios de Embutimento em campo estão demonstrados na Tabela 4.

**Tabela 4.** Resultados obtidos do ensaio de embutimento.

Espessura (mm)	Lado Operador		Centro		Lado Motor	
	Atual	Proposto	Atual	Proposto	Atual	Proposto
2,25	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
3,00	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
4,25	Aprovado	Aprovado	Reprovado	Aprovado	Reprovado	Aprovado

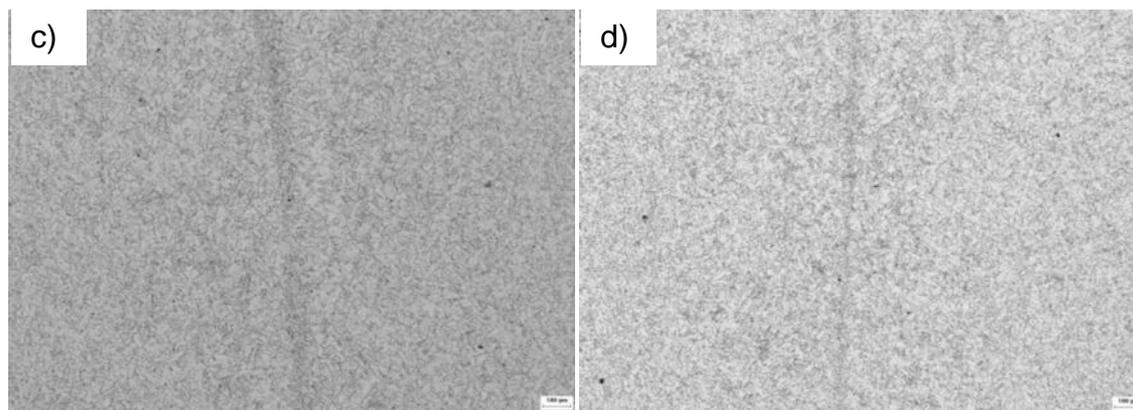
É possível observar na Tabela 4 que, nas amostras de 4,25mm, amostras soldadas no parâmetro atual foram reprovadas. Esse fato pode ser explicado por uma combinação entre parâmetros não ideais e eletrodo em fim de vida útil. Alterando o parâmetro de solda, mesmo com o eletrodo em fim de vida útil a solda se mostrou mais confiável.

As Figuras 6, 7 e 8 mostram as micrografias da interface de solda das amostras 2,25mm, 3,00mm e 4,25mm, respectivamente.



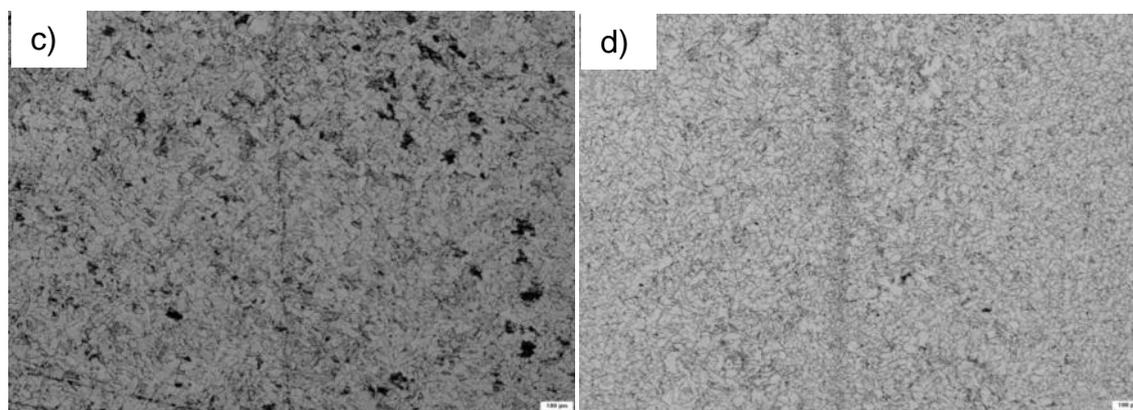
**Figura 6** – Micrografias da interface de solda da amostra de 2,25mm. a) parâmetro atual centro; b) Parâmetro proposto centro.

Na amostra de 2,25mm, tanto o parâmetro proposto quanto o parâmetro atual mostraram uma fase ferrítica em toda a sua área. Nota-se uma interface de solda mais pronunciada no parâmetro proposto que no parâmetro atual.



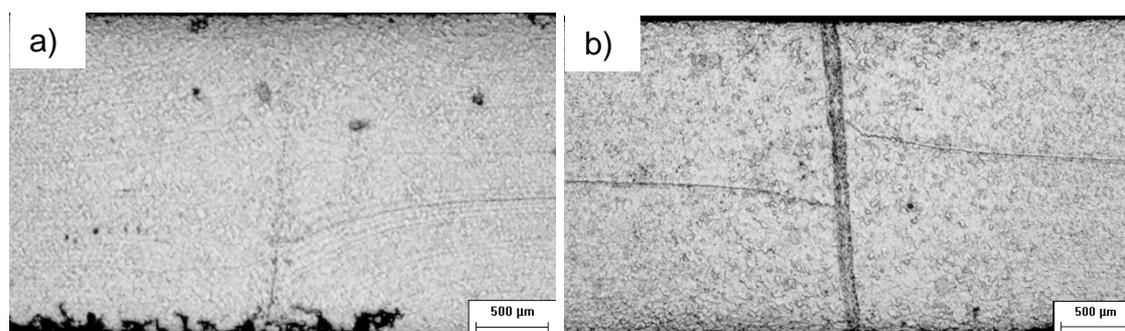
**Figura 7** - Micrografias da interface de solda da amostra de 3,00mm. a) parâmetro atual centro; b) Parâmetro proposto centro.

Na amostra de 3,00mm também se tem uma fase ferrítica por toda a solda independente do seu parâmetro. Nota-se que houve um maior refino de grão na interface da solda do parâmetro proposto, indicando uma melhora de suas propriedades mecânicas.



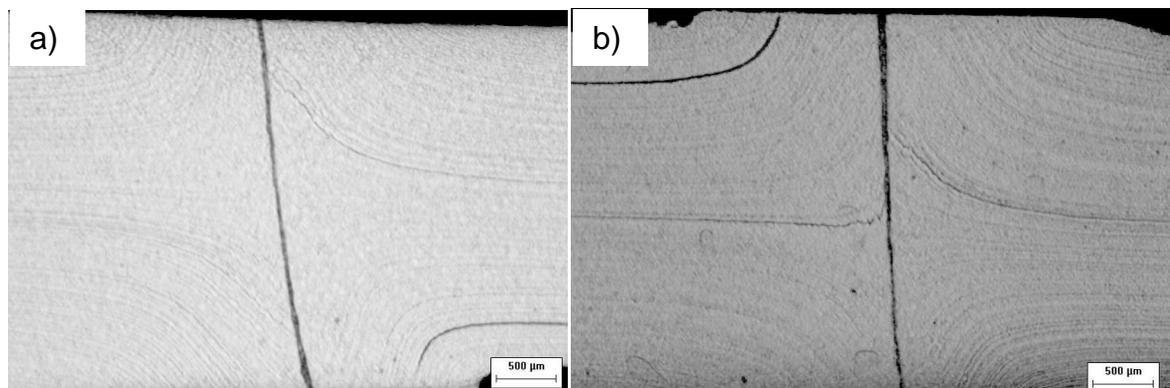
**Figura 8** - Micrografias da interface de solda da amostra de 4,25mm. a) parâmetro atual centro; b) Parâmetro proposto centro.

Como nas demais amostras, também apresenta uma fase predominantemente ferrítica, porém, com uma interface de solda mais destacada no parametro atual. Nas amostras do parâmetro atual podem ser visualizadas algumas inclusões de oxidos alinhadas à interface. Estas, atuam como concentradores de tensão na solda e, comparando-se com os resultados da Tabela 4, podem justificar a reprovação das amostras no ensaio de embutimento. Além disso, foi possível observar um maior refino de grão com o parâmetro proposto. As análises de linha de fluxo podem ser vistas nas Figuras 9, 10 e 11 a seguir:



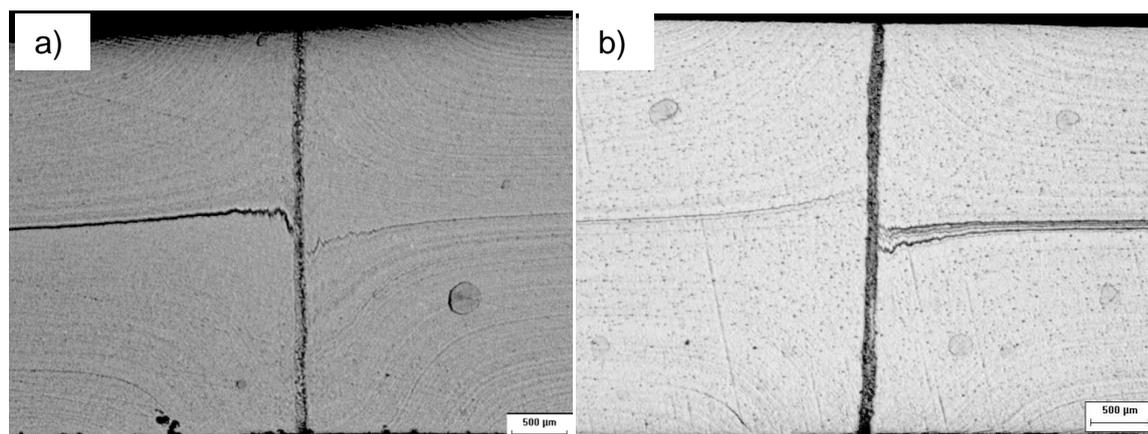
**Figura 9** – Linha de fluxo da amostra centro 2,25mm. a) parâmetro atual; b) Parâmetro proposto.

Na amostra de 2,25mm, na análise de linhas de fluxo, nota-se que no parâmetro atual a interface esta mais pronunciada. Isto pode significar uma maior concentração de energia neste ponto, conseqüentemente, uma maior concentração de defeitos.



**Figura 10** - Linha de fluxo da amostra centro 3,00mm. a) parâmetro atual; b) Parâmetro proposto.

Nas amostras de 3,00mm a interface mais pronunciada ocorre no parâmetro atual e não no parâmetro proposto. As linhas de fluxo se mostraram coerentes entre si, não apresentando diferenças significativas entre os dois parâmetros.



**Figura 11** - Linha de fluxo da amostra centro 4,25mm. a) parâmetro atual; b) Parâmetro proposto.

Na amostra 4,25mm, as linhas de fluxo do parametro atual estão com uma angulatura muito severa, indicando possivelmente um recalque inadequado. Já no parametro proposto, o ângulo das linhas de escoamento se aproxima do ideal de 45° para o processo. Isto garante uma melhor qualidade de solda, devido ao escoamento adequado de impurezas da interface para fora do cordão durante o recalque.

A partir destes resultados, a Tabela 5 sintetiza o consenso dos membros envolvidos no projeto, para a avaliação da implantação do parametro proposto para testes em escala industrial.

**Tabela 5.** Comparativo dos resultados do Parâmetro Proposto em relação ao Atual.

	Metalografia	Linhas de fluxo	Embutimento	Resultado
2,25 mm	✘	✘	✓	REPROVADO
3,00 mm	✓	✓	✓	APROVADO
4,25 mm	✓	✓	✓	APROVADO

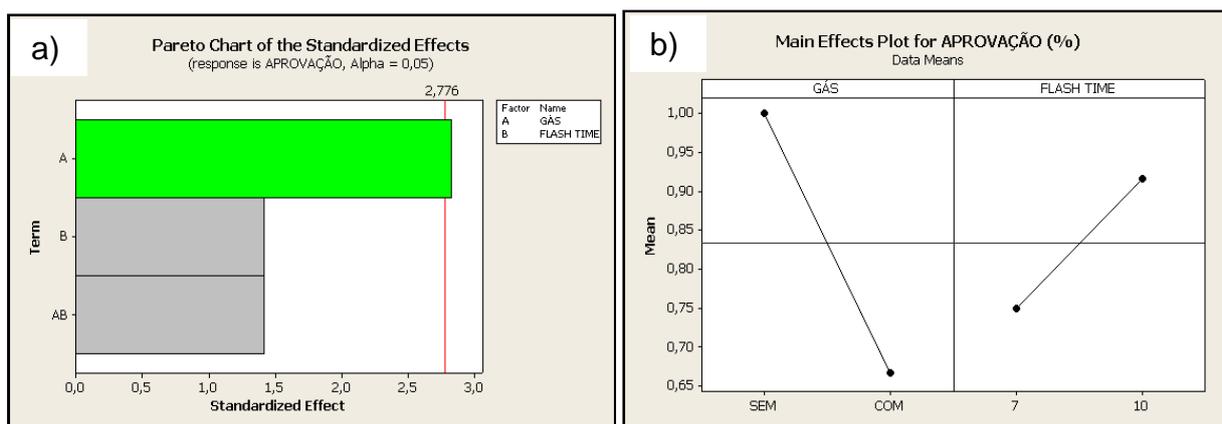
De acordo com a Tabela 5, a amostra de 2,25mm, utilizando o parâmetro proposto do tempo de centelhamento, apresentou um desempenho inferior ao parâmetro usado



**Tabela 6.** Valores de dureza das amostragens estudadas

AMOSTRAGEM	Dureza MB (HV)	Dureza ZTA (HV)	AUMENTO (%)
3,00mm (Ambos os Parâmetros)	107,9	133,8	24%
4,25mm (Parâmetro Atual)	107,9	130,3	21%
4,25mm (Parâmetro Proposto)	118,5	137,9	16%

A segunda parte das análises, onde foi realizado o *DOE* com objetivo em avaliar a influência tanto da redução do tempo de centelhamento pelo parâmetro proposto quanto pela utilização ou não do gás na faixa de espessuras < 2,52mm, utilizando uma amostra de 2,00mm, teve como melhor resultado o tempo atual, entretanto, com a ausência do gás de proteção, como demonstram a Figura 14.



**Figura 14.** Resultados DOE. a) Gráfico de Pareto sobre a adoção do parâmetro proposto e o uso de gás natural; b) Análise do principal efeito na aprovação da solda. Fonte: Minitab 16

## 4 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, foi possível se verificar algumas conclusões:

- O tempo de centelhamento para espessuras  $\geq 2,52$ mm pode ser reduzido sem comprometer a qualidade da solda;
- A retirada do gás de proteção não afetou a qualidade da solda para os aços baixo carbono, sendo possível inclusive, um resultado superior com a sua ausência na amostra representativa das espessuras < 2,52mm
- Nos ensaios para espessuras elevadas, próximas de 4,25mm, foi possível se observar inclusive uma melhora na qualidade da solda.

## Agradecimentos

Ao Gerente da decapagem, Gerson Alves, ao Gerente Geral de laminados à quente, Danilo Guelli G. Oliveira e à Companhia Siderúrgica Nacional, que deram todo o suporte para a realização do trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 Welding Handbook. Flash, Upset, and Percussion Welding. Cap. 18, p.582-597;
- 2 Bilic Z, Misina N, Gorkic A, Polajnar I. The influence of significant parameters on mechanical properties of the resistance flash welds. 60<sup>th</sup> Annual Assembly of IIW/IIS, 2007.



- 3 Resistance Welder Manufacturers RWMA, Resistance Welding Manual, ed. 4, p.5-16, 2003.
- 4 Modenesi PJ. Introdução aos Processos de Soldagem. Ed. UFMG Belo Horizonte, p.37, 2006.
- 5 Filho OG. Influencia da corrente elétrica, da força de recalque e do tratamento térmico de revenimento na soldagem a topo a topo por centelhamento de serras de fita bimetálica. USP São Paulo, 2007, p.45.
- 6 Kim DC, So WJ, Kang MJ. Effect of flash butt welding parameters on weld quality of mooring chain. Archives of materials science and engineering, 2009; 39: 113.
- 7 Ziemian CW, Sharma MM, Whaley DE. Effects of flashing and upset sequences on microstructure hardness, and tensile properties of welded structural steel joints. Materials and Design V.33, Ed. Elsevier Ltd, 2011, p.1-5.
- 8 Arabaci U, Çetînkaya C, Akay A. An Investigation of Effects of Upsetting Current Time and Normalization Heat treatment on Mechanical Properties of X40CrMoV5 1 and C1030 steels Joined by Flash Butt Welding. Materials and Design V.28. Ed. Elsevier Ltd., 2006, p. 2351-2360.
- 9 Ghosh PK, Gupta PC, Pal OM, Avtar, Jha BK, Dwivedi VS. Influence of weld thermal cycle on properties of Flash Butt Welded Mn-Cr-Mo Dual Phase Steel. ISIJ International, 1993; 33: 807-815, 1993.
- 10 Yurioka N. Physical Metallurgy of Steel Weldability. ISIJ International, 2000; 4: 566-570.
- 11 Training Manual – 62” Combination Flash Butt Welder Upgrades for Pickle Line #3, Companhia Siderurgica Nacional
- 12 ASTM E92 – 82 (Reapproved 2003): Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials.