

FRAGILIZAÇÃO DE SOLDAS DE AÇO BAIXO CARBONO POR ELEVADO TEOR DE COBRE¹

Angel Rafael Arce Chilque²
Marnie Hillary Carvalho Leão³

Resumo

O trabalho aborda experimentos de soldagem de corpos de prova em aço SAE1020 utilizando os processos de soldagem, semi-automático MAG com arame consumível ER70S6 e ao arco elétrico manual com eletrodo revestido básico E7018. Para o experimento de soldagem usaram-se duas chapas em aço SAE 1020, nas quais foram usinados chanfros de 60°. O experimento consiste em preencher o chanfro utilizando os processos de soldagem acima mencionados. Para analisar o efeito do cobre durante a soldagem, foram inseridos fios de cobre dentro do chanfro. Após a soldagem, foram realizadas inspeções visual e radiográfica dos corpos de prova soldados, os quais foram, posteriormente, preparados para análise em microscopia óptica e eletrônica de varredura (MEV). Os resultados metalográficos dão conta da elevada fragilização do aço pelo cobre, levando à fissuração a quente das juntas soldadas tanto da zona fundida quanto da zona afetada pelo calor. Sendo tal fissuração de natureza intergranular.

Palavras-chave: Fragilização pelo cobre; Soldagem; Fissuração.

EMBRITTEMENT OF WELDING LOW CARBON STEEL BY HIGH COPPER CONTEND

Abstract

This paper treats about welding experiments on SAE 1020 steel employing the semiautomatic welding – Gas Metal Arc Welding (GMAW) with consumable wire ER70S6 and shielded manual arc welding (SMAW) with basic electrode E7018. For this experience were used two plates of low carbon steel, in which groves were machined with angle of 60 degrees. The experience consists into fill the groove using the weld process above. In order to analyze the copper embrittlement effect, copper wires were inserted into the groove. After welding, visual and radiographic inspection were accomplished on the welded joint specimens, after that were prepared for optical metallographic analysis and scanning electron microscope. The metallographic results and punctual chemical analysis have shown the high embrittlement of steel by copper leading to hot cracking of the fusion zone and the heat affected zone, this crack being of intergranular nature.

Key words: Embrittlement by copper; Welding; Cracking.

¹ Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Docteur es Sciences Physiques; professor da Universidade do Estado de Minas Gerais.

³ Graduanda em Engenharia Metalúrgica pela Universidade do Estado de Minas Gerais.

1 INTRODUÇÃO

Segundo Camey e Branco⁽¹⁾ embora adições de cobre sejam interessantes para elevar a resistência à corrosão de aços estruturais, a fabricação destes enfrenta problemas de ruptura intergranular na laminação de chapas grossas. O acúmulo de cobre metálico em temperaturas elevadas, onde o cobre ainda se encontra em estado líquido (~1.080°C), pode ser suficiente para dar início ao fenômeno conhecido por ataque por metal líquido. Neste caso, o efeito de Kirkendall é observado, fazendo com que lacunas se concentrem nos contornos de grão, onde elas se aglomeram, criando uma trinca que é preenchida pelo cobre líquido.

Fedricksson, Hanson e Olson⁽²⁾ condizem citando que a exposição direta do aço ao cobre é crítica, no que diz respeito à fragilização. Durante a difusão, o cobre difunde entre os grãos de aço. Assim, o efeito Kirkendall ocorre, gerando vacâncias nas proximidades dos contornos de grãos. Essas vacâncias são preenchidas com o cobre líquido, resultando na fragilização do metal. A Figura 1, a seguir, mostra um desenho esquemático que ilustra o efeito da exposição direta do aço ao cobre.

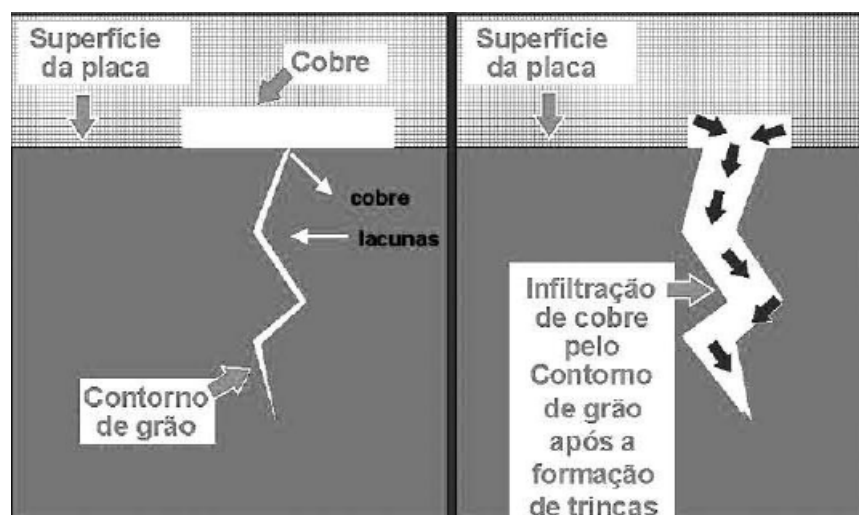


Figura 1: Ilustração do fenômeno de infiltração de cobre pelo contorno de grão.⁽²⁾

Arce⁽³⁾ afirma que no processo de soldagem por fusão é possível definir três regiões básicas: (a) Zona Fundida (ZF): região onde o metal fundiu-se e solidificou-se durante a operação de soldagem. (b) Zona termicamente afetada (ZTA): região não fundida do metal de base que teve sua microestrutura e/ou propriedades alteradas pelo ciclo térmico de soldagem. (c) Metal de Base (MB): região mais afastada do cordão de solda e que não foi afetada pelo processo de soldagem.

Silva⁽⁴⁾ descreve as características das trincas a quente como necessariamente associadas à concentração de impurezas nas regiões onde a fissura se forma. Além disso, se originam invariavelmente nos contornos de grão, espaço interdendrítico ou intergranular durante a solidificação da solda. A presença de impurezas que se concentram na última parcela do líquido a se solidificar entra em conflito com as tensões de contração da solda, mantendo um filme líquido na zona fundida, devido ao baixo ponto de fusão, que não confere resistência mecânica suficiente para suportar as tensões da solda. Este tipo de heterogeneidade, chamada segregação, pode se manifestar de forma macroscópica, microscópica (nos contornos de grão e nos espaços interdendríticos) e de forma intergranular.

Marques⁽⁵⁾ afirma que a fissuração na solidificação, ou fissuração a quente, é um mecanismo formador de trincas relacionado com a formação de filmes de metal líquido segregado entre os contornos de grão do metal nas fases finais da solidificação e com a incapacidade da estrutura resistir às contrações do material. Esse tipo de fratura se desenvolve no centro do cordão de solda, mas é capaz de surgir em diferentes localizações e orientações, inclusive como microtrincas.

Há ainda outro fator que favorece a formação de trincas a quente. Segundo Silva⁽⁴⁾ a morfologia das chapas exerce importante papel na determinação do grau de susceptibilidade a trincas, sendo que chapas grossas são mais propensas a trincas a quente.

Esse trabalho objetiva o estudo introdutório da fragilização do aço SAE1020, em consequência da inserção de fios de cobre na solda. A avaliação é feita por meio de análises metalográficas, visando avaliar o grau de comprometimento (fragilização e fissuração) que este tipo de impureza pode causar nas juntas soldadas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o experimento de soldagem adotou-se duas placas em aço SAE 1020, medindo 150 mm x 23 mm x 300 mm, nas quais foram usinados chanfros em V de 60°. O experimento se baseia em preencher esses chanfros com solda MAG utilizando eletrodo ER70S6 em um corpo de prova e com processo SMAW com eletrodo E7018 no outro corpo de prova. Além disso, para analisar o efeito da fragilização pelo cobre, incluíram-se filetes de cobre dentro do chanfro.

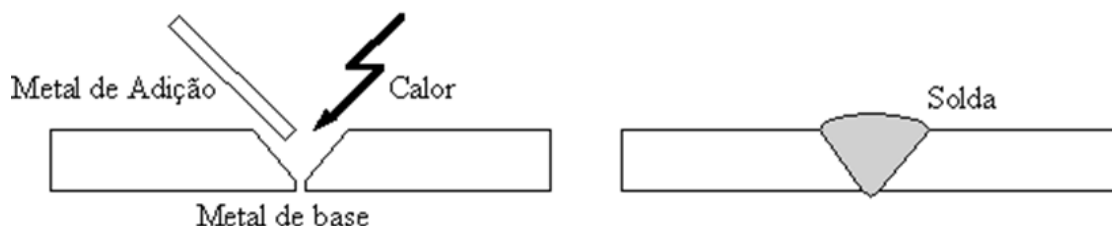


Figura 2: Esquema do procedimento de soldagem, sendo que o cobre foi adicionado intencionalmente entre passes de solda.⁽⁵⁾

A seguir passo a passo do procedimento:

- Os corpos de prova foram montados e fixados, para evitar deformação durante a soldagem, com uma abertura de raiz de 2,5 mm.
- A soldagem pelos processos MAG e SMAW incluiu um cordão de solda de raiz, para posicionamento dos fios de cobre no chanfro, como ilustra a Figura 3.
- Os fios de cobre foram fixados no chanfro através de pontos de solda.
- Posteriormente foram efetuados os passes de enchimento e acabamento do corpo de prova como mostrado na Figura 4.



Figura 3: Corpos de prova, mostrando a colocação de fios de cobre no chanfro.



Figura 4: Corpo de prova pronto para ensaios não destrutivos.

Tabela 1: Parâmetros adotados nos processo de soldagem

Parâmetros	Processo ao arco elétrico manual	Processo MAG
Amperagem	130 ^a	110A
Voltagem	25V	70V
Velocidade do arame	--	9 m/min
Arame consumível	Eletrodo revestido E7018	ER70S6
Diâmetro do arame consumível	3,25mm	0,8mm
Nomenclatura adotada	CP 01	CP 02

3 RESULTADOS

Após a soldagem, corpos de prova foram submetidos à inspeção visual, onde foi possível observar a existências de poros superficiais na solda. Sendo assim, os corpos de prova, CP 01 e CP 02, foram enviados para a realização de exames radiográficos.

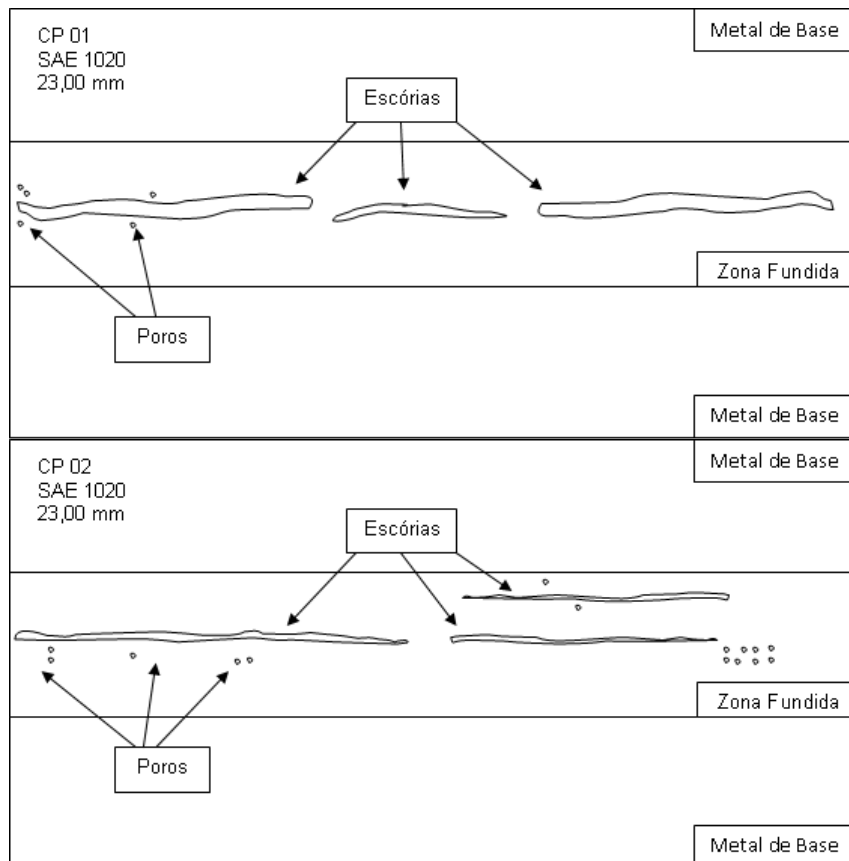


Figura 5: Esquemas das radiografias dos CP 01 e CP 02 copiados dos originais feitos à mão livre pelo inspetor responsável pelo teste radiográfico.

Segundo o laudo emitido pelo inspetor de radiografia qualificado, as amostras foram reprovadas no teste radiográfico por possuírem defeitos como inclusões e porosidades. As inclusões são concentradores de tensões severos e facilitam a formação de trincas. Além disso, as porosidades podem afetar as propriedades mecânicas, sendo possível que tais defeitos tenham ocorrido devido à inclusão de cobre na solda.

Após as radiografias, os corpos de prova foram preparados para a análise metalográfica, como ilustrado na Figura 6.



Figura 6: Corpos de prova submetidos à soldagem com inclusão de cobre após cortados e lixados para a análise metalográfica.

Após polimento, as amostras foram observadas através de microscopia óptica e eletrônica de varredura (MEV). O exame macrográfico do CP 01, mostrado na Figura 7, torna evidente a fissuração da zona fundida.

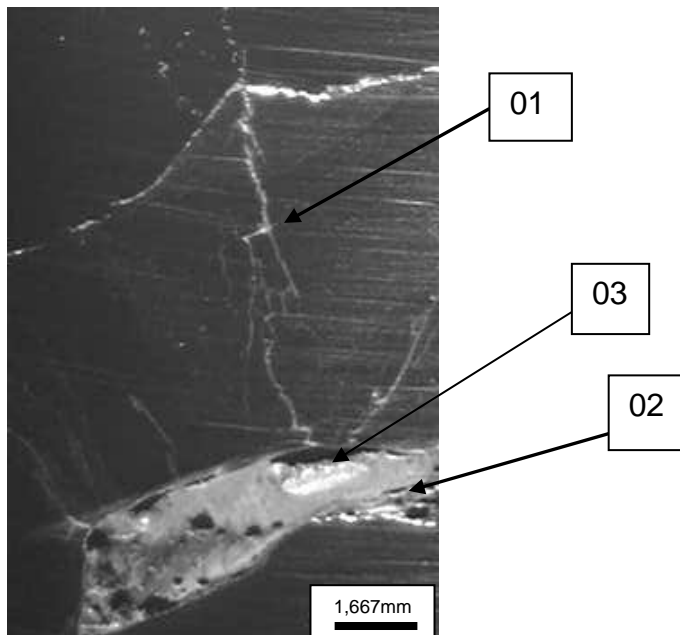


Figura 7: Zona fundida do CP 01 com aumento de 6x.

A mesma permite observar claramente que a zona fundida do CP 01 foi profundamente afetada pela inclusão de cobre, sendo que o mesmo provocou trincas (seta 01) e favoreceu a inclusão de escórias (seta 02), além de gerar falta de fusão na amostra (seta 03). Corroborando os resultados obtidos pela radiografia.

A Figura 8 mostra a mesma área com aumento de 50 vezes no MEV. As figuras seguintes dão conta da presença de cobre nas trincas mostradas por esta.

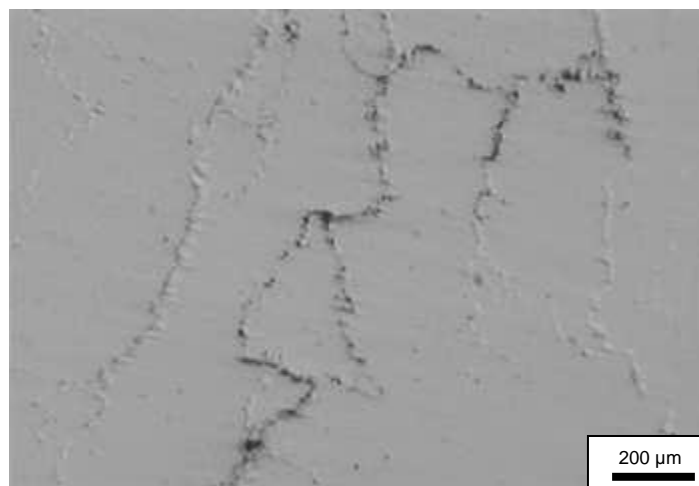


Figura 8: Trincas onde o cobre penetrou na zona fundida do CP 01.

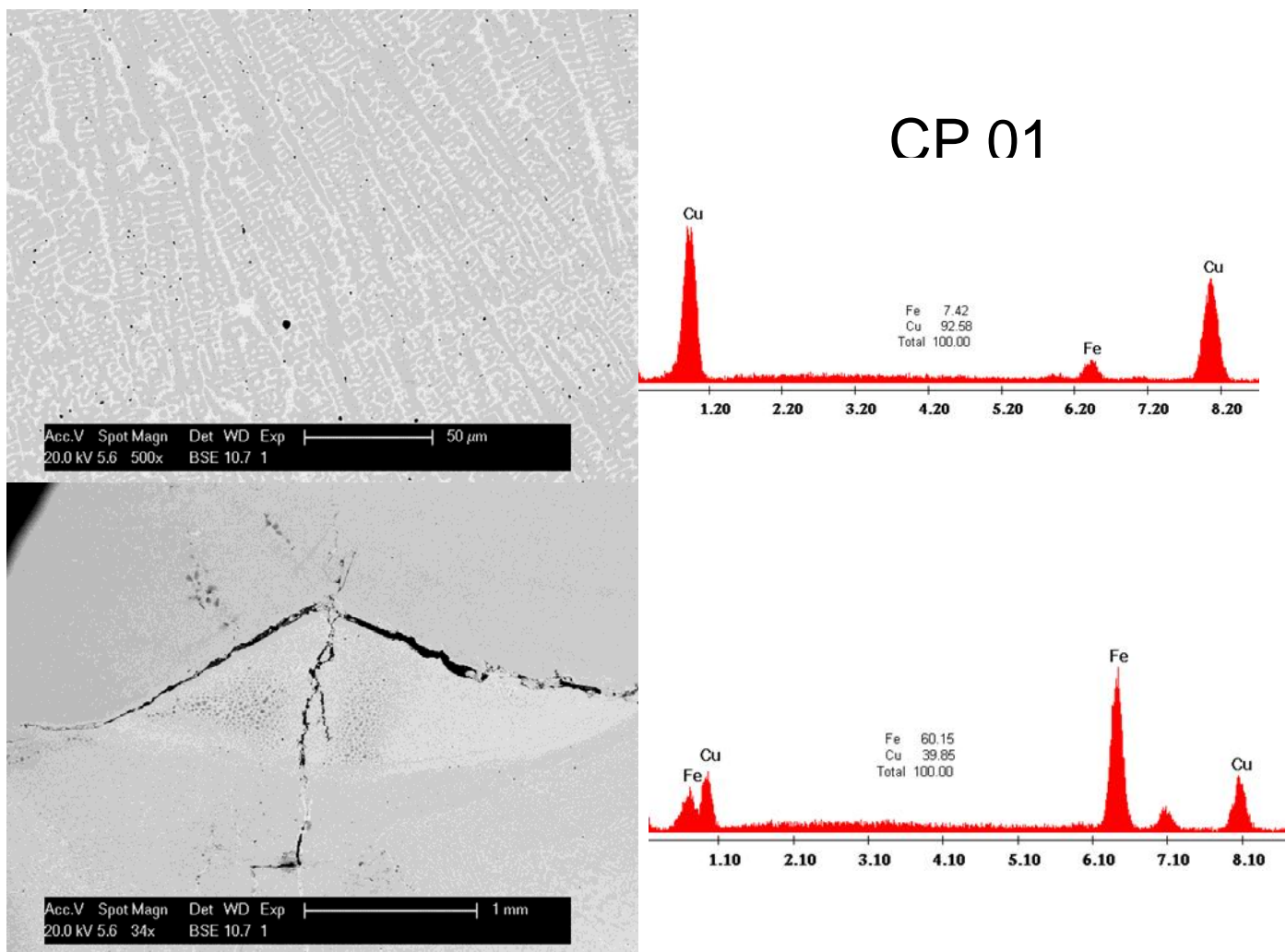


Figura 9: Análise do CP 01 no microscópio eletrônico de varredura.

A Figura 9 apresenta a análise química do CP 01. Na parte superior desta figura é possível ver a formação de dendritas que, segundo Colpaert⁽⁶⁾ são formações decorrentes da solidificação em interface não plana. Nos aços ligados, há maior estabilidade para o crescimento do sólido da interface sólido-líquido não plana. Neste caso, as condições oferecidas durante o processo de soldagem favoreceram a solidificação do aço na forma de dendritas. A análise química pontual de uma formação dendrítica mostra que há 92,58% de cobre na mesma, assim pode-se concluir que o cobre se difundiu entre as dendritas da zona fundida na estrutura do CP 01.

Após análise química do CP 01, a amostra foi atacada com Nital 2% e analisada por microscópio eletrônico, onde foi possível a observação da microestrutura e de defeitos provocados pela inclusão de cobre na amostra.

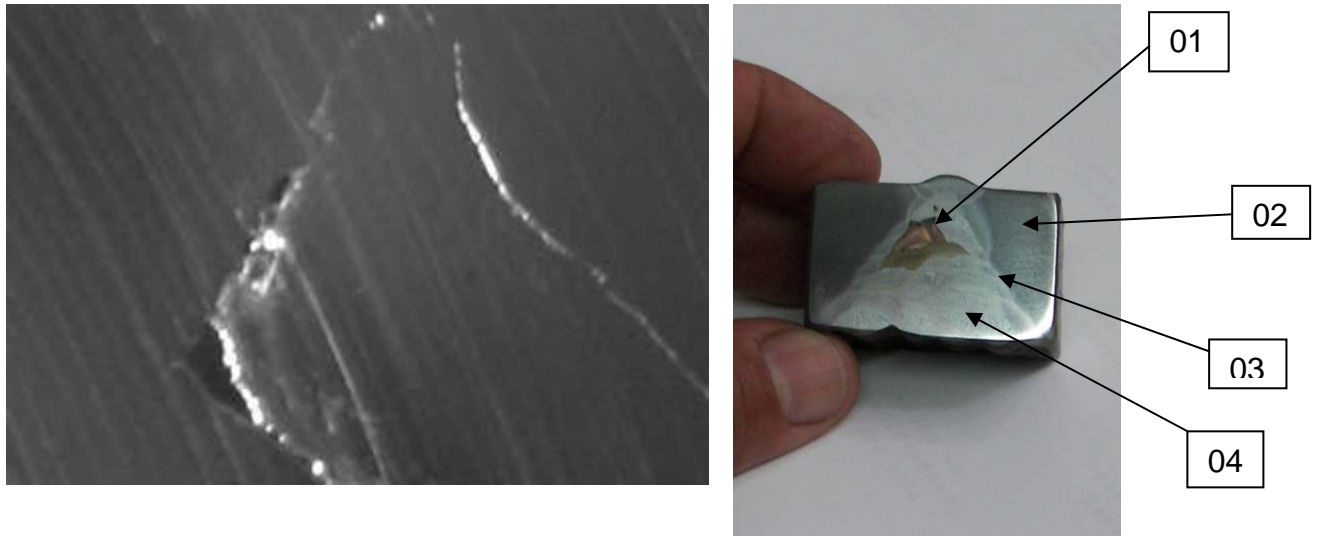


Figura 10: CP 01 após ataque de Nital 2%.

Após o ataque metalográfico, tornou-se evidente a nível macroscópico a presença de cobre na zona fundida devido à coloração típica (seta 01) do metal. Além disso, foi possível observar as diferentes zonas da junta soldada: zona fundida (seta 04), zona termicamente afetada (seta 03) e o metal de base (seta 02) (Figura 10).

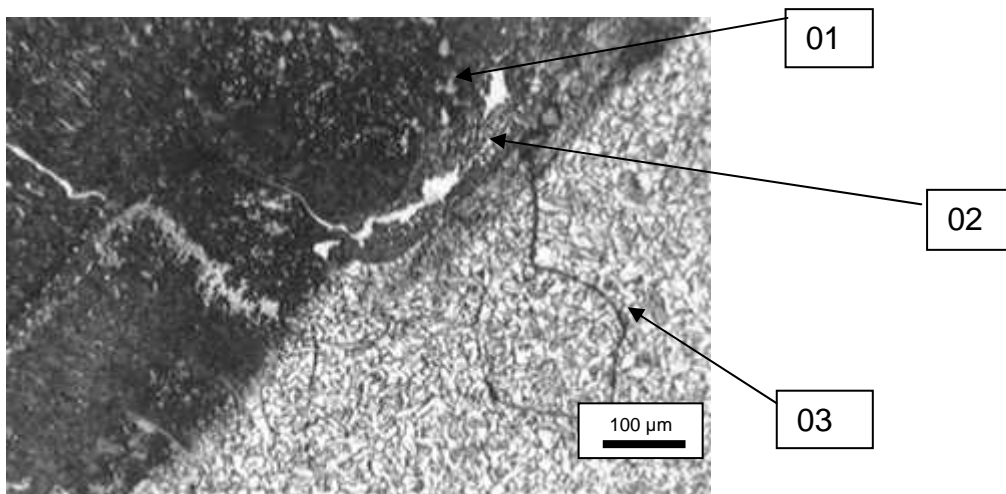


Figura 11: Linha de ligação entre a zona fundida e a zona termicamente afetada do CP 01. Aumento de 100 vezes.

A Figura 11 mostra a fragilização do aço. A seta 03 mostra a fissura presente na ZTA, sendo está, uma prolongação do defeito proveniente da zona fundida do corpo de prova (seta 01) onde é possível observar a presença de cobre. Tal trinca passa pela zona de ligação (seta 02) onde o cobre deixa de se infiltrar pela mesma. No CP02 foram realizados os procedimentos de preparação para análise metalográfica e posteriormente o mesmo foi analisado em microscópios óptico e eletrônico, onde se avaliou as avarias da peça provocadas pelo processo que a peça foi submetida.

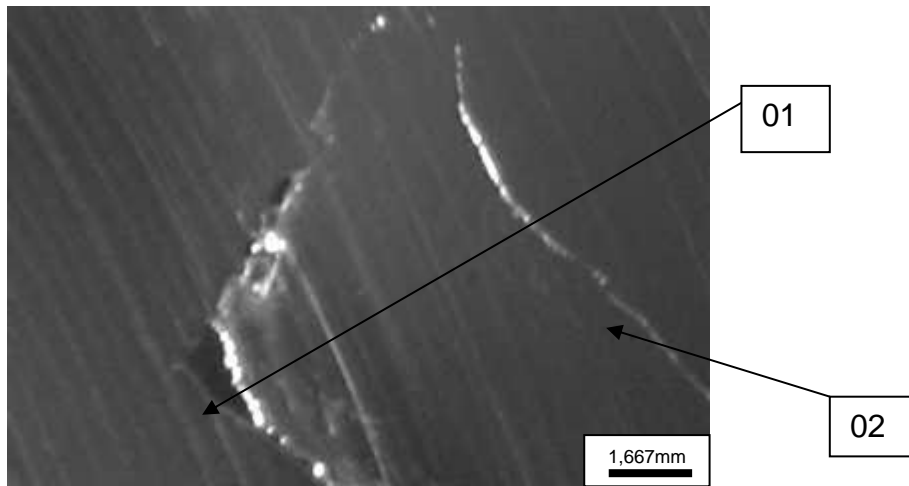


Figura 12: Aumento de 6 vezes em CP 02.

Os detalhes indicados por setas na figura 12 mostram discontinuidades estruturais na região onde foi depositado cobre na zona fundida do CP 02, sendo que, o destaque 01 mostra a falta de fusão entre passes adjacentes a partir da qual se manifestaram as trincas destacadas pela seta 02.

Posteriormente a análise da amostra sem ataque químico, submeteu-se a mesma ao microscópio eletrônico de varredura, onde se comprovou a presença de cobre na área mostrada na Figura 12.

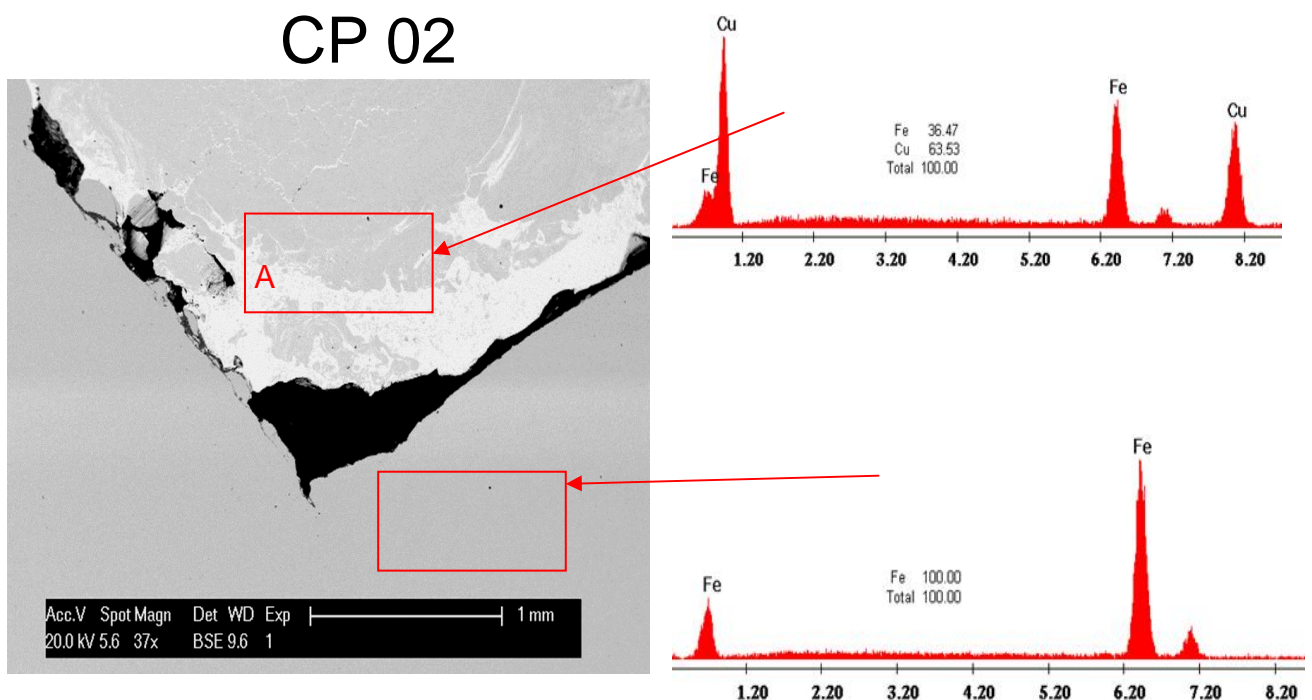


Figura 13: Análise do CP 02 no microscópio eletrônico de varredura.

A Figura 13 mostra a análise da zona fundida do CP 02. A amostra apresentou 63,53% de cobre após o processo de soldagem devido à inclusão deste metal (ver

detalhe A na Figura 13). Já a análise da área B não mostrou difusão do cobre, permanecendo em 100% de ferro.

Em seguida o CP 02 foi atacado com solução de Nital 2% quando ficou visível a separação entre as regiões básicas da solda por fusão. Posteriormente a amostra foi novamente analisada sob microscópio eletrônico, onde foi possível observar de forma mais clara as descontinuidades do CP 02. A seguir as imagens obtidas desta análise com aumentos de 200 vezes e 50 vezes.

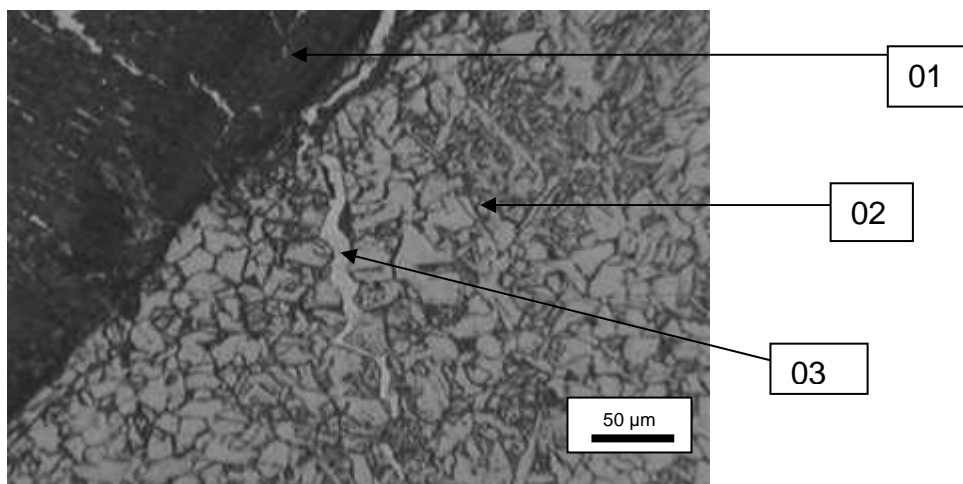


Figura 14: Trinca com infiltração intergranular de cobre (03) que ultrapassou a zona fundida (01) atingindo a zona termicamente afetada (02).

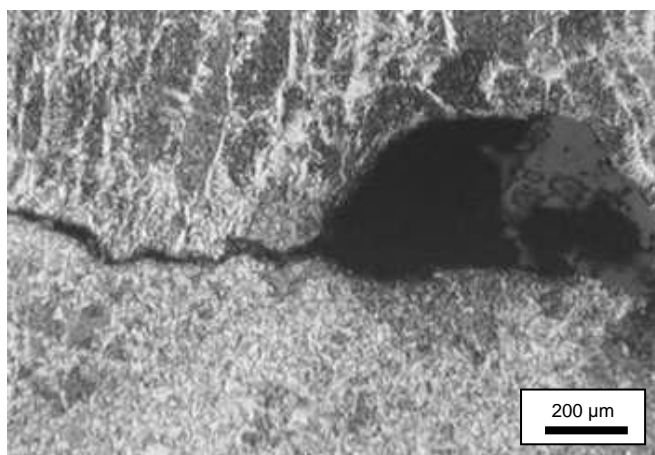


Figura 15: Trinca e vazio em CP 02 na extremidade oposta da zona fundida em relação à inclusão de cobre.

4 DISCUSSÃO

As macrografias e micrografias ópticas e eletrônicas apresentadas nas Figuras 7 a 15 dão conta da presença de defeitos de soldagem, tais como, poros, inclusões, falta de fusão e fissuras preenchidas com cobre. As fissuras contendo cobre (fissuras a quente) ocorreram na zona fundida e na zona afetada pelo calor. Os defeitos, inclusões e falta de fusão, dão origem às fissuras, incluindo fissuras interdendríticas na ZF. Já na ZTA a fissuração ocorreu de forma intergranular, concordando com o que foi afirmado por Fedricksson, Hanson e Olson,⁽²⁾ que o cobre se infiltra pelos contornos de grãos do aço sólido formando trincas. Dessas

trincas, irradiaram novas fissuras menores formando uma ramificação por onde o cobre, em seu estado líquido se propagou pelos contornos de grão, em acordo com Marques.⁽⁵⁾

As afirmações de Silva⁽⁴⁾ condizem com os efeitos da inclusão de cobre nas soldas. A inserção de fios de cobre é uma técnica utilizada para elaborar corpos de prova com defeitos controlados para análise quantitativa em ensaios não destrutivos (raio-x e ultrassom). No presente caso se acompanha a evolução do cobre durante a soldagem e a extensão da fragilização por ele provocada tanto na zona fundida quanto na zona afetada pelo calor, o que é mostrado nas figuras acima referidas. Além disso, o cobre possui ponto de fusão bem inferior se comparado ao aço baixo teor de carbono, enquanto o cobre possui ponto de fusão de 1.083°C, este parâmetro para o aço está acima de 1.500°C, o que permite sua permanência no estado líquido durante as contrações de solidificação na zona fundida, possibilitando a sua segregação nos contornos de grãos. Também se observou a presença de cobre nos espaços interdendríticos da zona fundida do CP 01, como mostrado pela Figura 9.

Os resultados mostram que ambas as amostras sofreram severa fragilização pela inclusão de elevados teores de cobre, podendo-se confirmar que o cobre é um agente fragilizador do aço SAE1020 nas condições apresentadas, pois inclusão de fios de cobre em estado puro durante a soldagem deste aço favoreceu a aparição de descontinuidades estruturais, tais como trincas, poros, inclusões e falta de fusão entre cordões adjacentes, concentradas na região onde houve a inserção do cobre, sendo que, nesta área foi possível analisar as avarias nos corpos de prova mesmo a nível macroscópico. Além disso, toda a amostra sofreu fragilização devido à difusão do cobre, o que é corroborado pelos exames metalográficos com ataque da solução de Nital 2%, juntamente com as análises no MEV (microscópio eletrônico de varredura) e também nas radiografias. Convém ressaltar que, apesar da severa fragilização dos corpos de prova com altos teores de cobre utilizados neste trabalho, o mesmo não representa as condições habituais de inclusão de cobre no aço, pois este elemento é usualmente utilizado em menores teores. Neste trabalho, o teor de cobre foi maximizado com intuito de provocar a fragilização do aço SAE1020.

5 CONCLUSÃO

Foi estudada a influência do elevado teor de cobre durante a soldagem do aço SAE1020. Os resultados obtidos permitem chegar às seguintes conclusões:

- houve formação de defeitos de soldagem, poros, inclusões, falta de fusão e fissuração;
- a fissuração da junta soldada comprometeu tanto a zona fundida quanto a zona afetada pelo calor. as fissuras foram provocadas pelo cobre líquido caracterizando um tipo de fissuração a quente;
- a fissuração a quente foi de natureza interdendrítica na zona fundida e intergranular na zona afetada pelo calor;
- os resultados das micrografias óptica e de microscopia eletrônica de varredura (mev) munida de analisador químico pontual são contundentes ao mostrar a fragilização e fissuração das juntas soldadas causadas pelo cobre líquido, sendo esta de natureza intergranular; e
- outros estudos precisam ser feitos para aprofundar e ampliar os resultados aqui encontrados.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Fapemig e a Universidade do Estado de Minas Gerais por incentivar e dar oportunidade para desenvolver habilidades no ramo de pesquisa científica. Agradeço também as empresas colaboradoras, sendo elas, Esmeta, Arcelor Mittal e Qualitec Engenharia LTDA. Além do apreço pelo Centro de Formação Profissional “Nansen Araújo”, unidade do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI de João Monlevade, o qual proporcionou a realização de fundamental etapa deste projeto.

REFERÊNCIAS

- 1 CAMEY, K.; BRANCO, V. P. V. Avaliação da Ação Combinada de Mecanismos de Fragilização de Contornos de Grão em Temperaturas Elevadas em Aços ao Cobre. In: **Congresso Anual da ABM**. Belo Horizonte, 2005.
- 2 FEDRICKSSON, H.; HANSON, K.; OLSON, A.. On the Mechanism of Liquid Cooper into Iron Grain Boundaries. In: **Scandinavian Journal of Metallurgy**, 2001, v.30, p.41-50.
- 3 MARQUES, P. V.; MODENESI P.J.; BRACARENSE, A. Q.. Fundamentos da Metalurgia da Soldagem In: **Soldagem, Fundamentos e Tecnologia**. Belo Horizonte: UFMG, 2009, cap. 6, pp. 93 – 110.
- 4 SILVA, C. L. J.; PARANHOS, R. Fissuração a quente (trincas a quente). **Infosolda**. 2003. Disponível em: < <http://www.infosolda.com.br/artigos/metsol04.pdf> > Acesso em: 15 fev. 2012.
- 5 ARCE, CH. A. R.. Processos de Soldagem. In: **Curso de graduação da FaEng – UEMG**. João Monlevade, 2012.
- 6 COLPAERT, H. Solidificação, Segregação e Inclusões Não-metálicas. In: **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. São Paulo: Blucher, 4^a edição, 2008, cap.8, pp 121 – 137.