

ANÁLISE DE FALHAS EM JUNTAS SOBREPOSTAS SOLDADAS POR RESISTÊNCIA⁽¹⁾

Camilo Bento Carletti⁽²⁾
Cleber Ricardo Chinaglia⁽³⁾
Nelson Guedes de Alcântara⁽⁴⁾
Claudemiro Bolfarini⁽⁵⁾

Resumo

Este trabalho tem como objetivo discutir a influência da microestrutura formada e das dimensões da lente de soldagem na ocorrência de falhas em juntas sobrepostas, quando utilizado o processo de soldagem por resistência em um componente automotivo. A caracterização microestrutural das juntas foi realizada via microscopia ótica com o objetivo de verificar a presença de defeitos e as microestruturas formadas. Os resultados indicam diferenças entre amostras com falhas e sem falhas tanto em aspectos dimensionais quanto nas microestruturas formadas.

Palavras-chave: Análise de falhas; Microestrutura; Soldagem por resistência; Indústria automobilística.

60º Congresso Anual da ABM, 25 e 28 de julho de 2005, Belo Horizonte.

¹ *Doutorando do PPG-CEM / DEMa - UFSCar. Rod. Washington Luiz Km 235 – 13565-905 – São Carlos – SP.*

² *Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais – CCDM/UFSCar.*

³ *Professor adjunto do DEMa - UFSCar e Diretor Executivo do CCDM.*

⁴ *Professor adjunto do DEMa - UFSCar e Gerente Geral do CCDM.*

1 INTRODUÇÃO

O princípio básico do processo de soldagem por resistência reside na passagem de corrente elétrica entre dois eletrodos não consumíveis que comprime peças distintas [1]. Conseqüentemente, devido à maior resistência apresentada pelas interfaces, ocorre fusão nesse local, formando a solda, como apresentado na Figura 1.

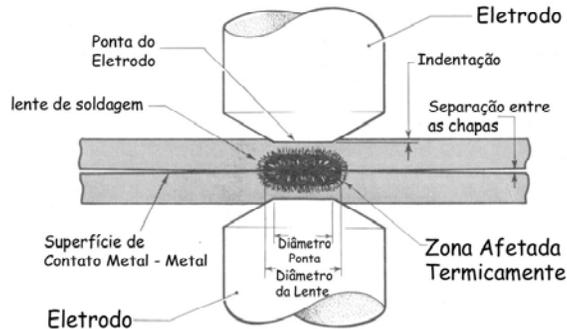


Figura 1. Ilustração do processo de soldagem por resistência (soldagem de resistência por ponto) [1].

De um modo geral há 3 tipos de processos de soldagem por resistência:

- ✓ **Soldagem por Ponto:** emprega eletrodos com uma determinada geometria que, durante a aplicação de carga e corrente durante um tempo pré-estabelecido, promove a fusão de uma área relativamente pequena formando o ponto.
- ✓ **Soldagem por Projeção:** O princípio de operação é o mesmo da solda por ponto, contudo a localização do ponto é determinada principalmente por ressaltos realizados na peça.
- ✓ **Soldagem por Costura:** neste processo os eletrodos são em forma de discos que, quando rotacionados, produzem diversos pontos que se sobrepõem, resultando numa junta extensa e contínua.

As soldas realizadas por esses processos são caracterizadas por altas taxas de aquecimento e resfriamento. Conforme a região imediatamente abaixo dos eletrodos é aquecida há um aumento significativo da resistência na interface das chapas, sendo esta uma condição fundamental para a formação da solda, com a fusão de um certo volume de material formando o “ponto” [1,2].

Em relação ao tipo de material que pode ser soldado pelos processos de resistência estão os aços ao carbono, inclusive os zincados, os baixa liga e os inoxidáveis, além de cobre, níquel, alumínio, magnésio, titânio e suas ligas. A Figura 2 ilustra como as características do material interagem com os processo de resistência.

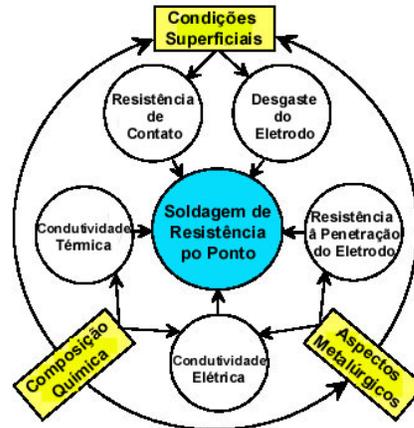


Figura 2. Interação das características do material com o processo de resistência. [3]

A solda formada entre as chapas é conhecida por *nugget* ou lente de soldagem, sendo que as propriedades mecânicas das soldas por ponto dependem da área de secção transversal da lente, assim como, de sua forma e tamanho. As variáveis que controlam a formação do *nugget* são: corrente de soldagem, tempo, resistência elétrica e força entre os eletrodos [2].

A soldagem por costura é uma adaptação da soldagem de resistência; neste caso os pontos de soldas são realizados em uma seqüência. A Figura 3 ilustra o princípio de funcionamento do processo.

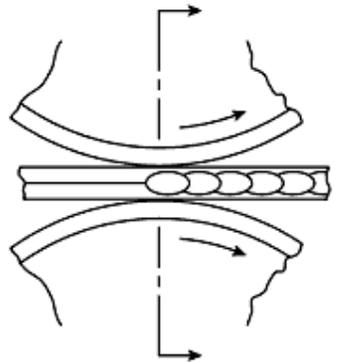


Figura 3. Ilustração do processo de soldagem por costura.

A soldagem de resistência por costura é utilizada na fabricação de uma série de componentes e peças automotivas, tais como amortecedores, devido a sua alta produtividade, não utilização de fluxos, metal de adição ou gás de proteção.

A qualidade da junta soldada é um fator crítico de desempenho para amortecedores, pois a ocorrência de falhas na soldas acarreta em vazamento de gás e faz com que o amortecedor necessite de retrabalho com custos adicionais de produção. Entende-se por retrabalho a repetição da operação de soldagem em amostras já soldadas, quando nessas são detectados algum tipo de vazamento em testes de estanqueidade.

Este trabalho tem como objetivo discutir a influência da microestrutura formada e das dimensões da lente de soldagem na ocorrência de falhas em juntas sobrepostas, quando utilizado o processo de soldagem por resistência em um componente automotivo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As soldas foram realizadas em juntas sobrepostas de aço 1020 utilizados em amortecedores, sendo que para cada lote analisado foi adotado um parâmetro de processo diferente. Assim, foram selecionados 5 lotes, num total de 63 amostras, sendo três lotes com vazamento (36 amostras) e dois lotes sem vazamento (26 amostras).

As amostras analisadas foram preparadas de forma usual, ou seja, passando-se pelas etapas de corte, embutimento, lixamento, polimento e ataque químico utilizando o reagente nital 2% para revelar a microestrutura das lentes de solda.

Considerando a análise das dimensões da lente de soldagem foram definidos parâmetros arbitrários de modo que fosse possível criar um padrão de comparação entre as soldas analisadas e relacioná-los com a presença ou não de defeitos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise Macrográfica da lente de solda

As macrografias mais relevantes e representativas dos lotes de amostras analisadas estão apresentadas na Figura 4.

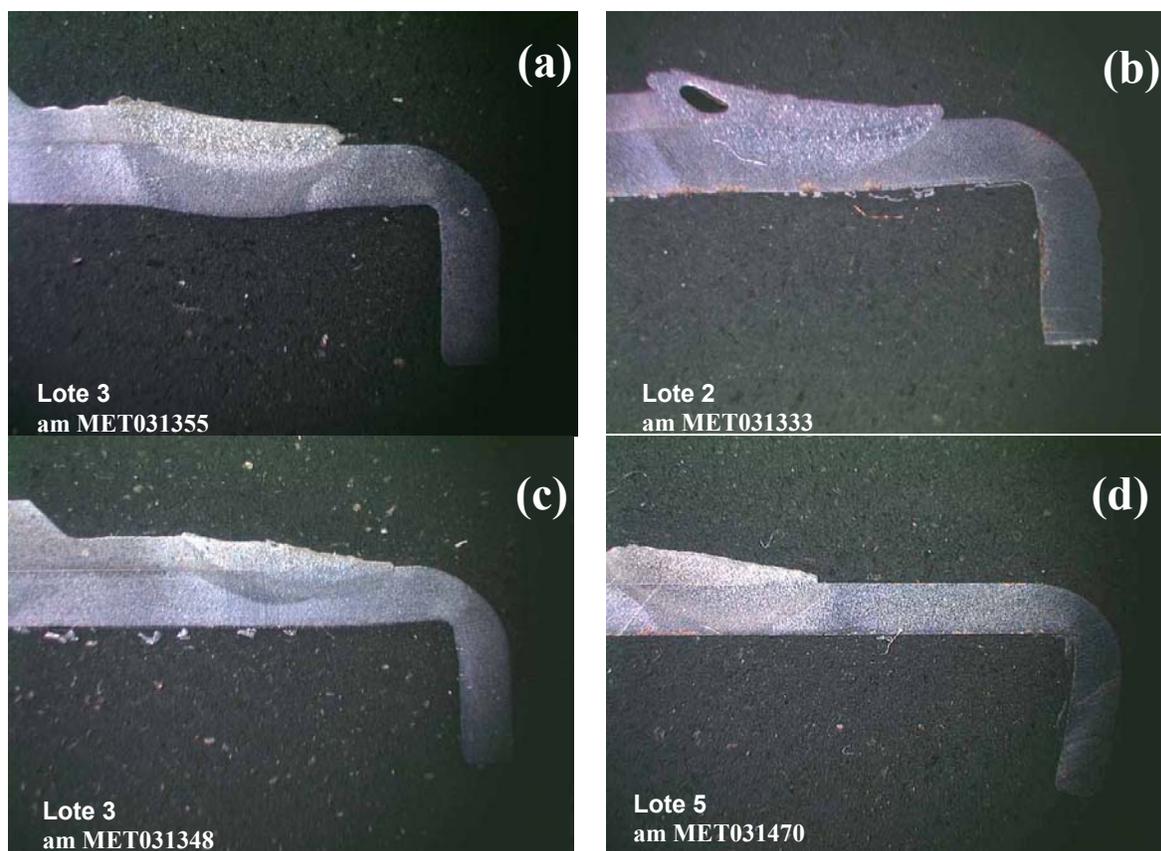


Figura 4. Macrografias mais relevantes e representativas dos lotes de amostras analisadas.

Analisando-se a Figura 4 (a) nota-se a presença de uma ZAT de dimensões maiores do que a espessura da chapa. Tal efeito pode ser decorrente de uma “fuga de corrente” durante o processo de soldagem. Já a Figura 4 (b) apresenta uma ZAT

com características semelhante à figura (a), contudo com a presença de defeitos internos decorrentes do retrabalho das amostras.

A Figura 4 (c) mostra uma ZAT de tamanho reduzido, enquanto que a figura 04 (d) ilustra uma ZAT com dimensões ideais, ou seja, com a ZAT exatamente na espessura da chapa. De modo geral a variação nas dimensões da ZAT está associada com os parâmetros de soldagem, tais como, corrente e pressão nos discos além da espessura das chapas a serem soldadas. A variação nas dimensões da ZAT também é responsável pela definição da lente de soldagem.

Análise Dimensional

A análise dimensional exigiu primeiramente a criação de parâmetros arbitrários, de modo a estabelecer um padrão de comparação entre as dimensões da lente de soldagem das amostras. A figura 5 ilustra a metodologia utilizada para definição dos parâmetros de análise.

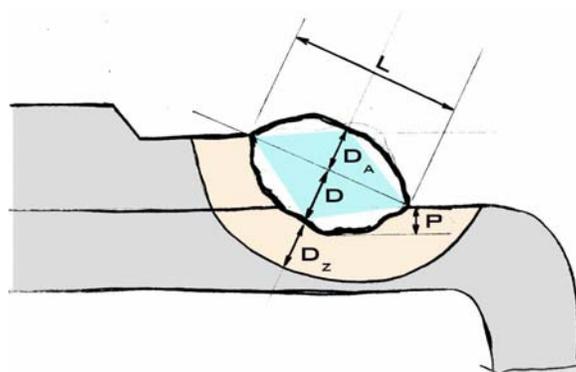


Figura 5. Representação esquemática da lente de solda evidenciando os principais parâmetros dimensionais considerados na sua caracterização.

A Tabela 1 resume os parâmetros dimensionais médios das lentes de solda, associando-os com os diferentes parâmetros de soldagem.

Tabela 1. Valores médios dos principais parâmetros das lentes de solda para os lotes que apresentaram vazamento (falha) – lotes 1, 2 e 3, e para os lotes sem vazamento (bom) – lotes 4 e 5, além dos parâmetros médios da soldagem que apresentaram variação de um lote para outro.

Lote	Lm (mm)	Dm (mm)	Dam (mm)	Dzm (mm)	Pm (mm)	TEm (mm ²)	LSm (mm)	Corrente solda (A)	Veloc. de solda	Pressão discos	Pressão axial
falha	3,95	0,75	0,10	0,88	0,43	1,68	2,9	270	161,7	2,63	37,3
bom	4,14	0,75	0,20	0,79	0,31	1,96	2,1	288	165,0	2,55	36,5

Lm – Largura máxima média das lentes de solda; **Dm** – profundidade média das lentes a partir da linha Lm; **Dam** – dimensão média das lentes acima da linha Lm; **Dzm** – dimensão máxima média das ZAT's; **Pm** – Penetração média das lentes de solda abaixo da linha de interface entre as duas chapas soldadas; **TEm** – Área de Trapézio equivalente médio que estima a área média das lentes; **LSm** – Linha de solda média que mostra a dimensão média da região de união efetiva entre as duas superfícies soldadas – onde houve efetivo rompimento da camada de fosfato.

De acordo com os valores médios apresentados na tabela 01 pode-se destacar alguns resultados relevantes quando comparados lotes com vazamento e lotes sem vazamento.

- **Penetração “P”** – foi possível observar que a penetração média dos lotes com vazamento foi 28% superior ao dos lotes sem vazamento – 0,43 mm contra 0,31 mm.
- **Linha de Solda “Ls”** – denomina-se “Ls” a extensão da junta soldada em que houve, de fato, rompimento da camada de fosfato efetivando a união metalúrgica das chapas. No caso dos lotes com vazamento, “Ls” foi 27% maior que nos lotes sem vazamento – 2,9 mm contra 2,1mm. A quebra da camada está associada à corrente de soldagem que por sua vez determina uma solda mais ou menos fria.
- **Área de Trapézio equivalente “Tef”** – essa medida representa uma aproximação para a área da lente soldada e seria um indicativo para o aporte térmico (quantidade de calor) durante a soldagem e no caso de um mesmo processo de soldagem também é indicativo da qualidade da solda. Para os lotes com vazamento a Tef foi 15% inferior aos dos lotes sem vazamento – 1,68 mm² contra 1,96 mm². Uma Tef menor se reflete em uma menor área resistente na junta soldada. De forma geral, em termos de área/volume, considerando parâmetros de soldagem constantes, uma Tef menor significa uma taxa mais elevada de resfriamento (gradiente térmico mais elevado). Isso tem conseqüências diretas nas propriedades da solda principalmente no que diz respeito à microestrutura presente que, no caso de resfriamentos mais rápidos, podem conduzir à formação de microestruturas frágeis.

Análise Microestrutural

A análise microestrutural revelou que 100% das amostras com vazamento apresentaram microestruturas frágeis tanto na lente de solda quanto na zona afetada termicamente (ZAT). Foram observadas essencialmente martensita, bainita e ferrita acicular – microestruturas frágeis prejudiciais às propriedades mecânicas da solda.

Os lotes sem vazamento apresentaram uma menor quantidade de microestruturas frágeis; no entanto, todas as lentes de solda apresentaram tais feições. Na ZAT 25% das amostras apresentaram microestrutura similar às dos lotes com vazamento, 25% apresentaram microestrutura normal (apenas ferrita e cementita modificada pelo calor) e 50% apresentaram uma microestrutura mista com as duas feições citadas anteriormente. A Figura 6 apresenta microestruturas representativas das amostras analisadas.

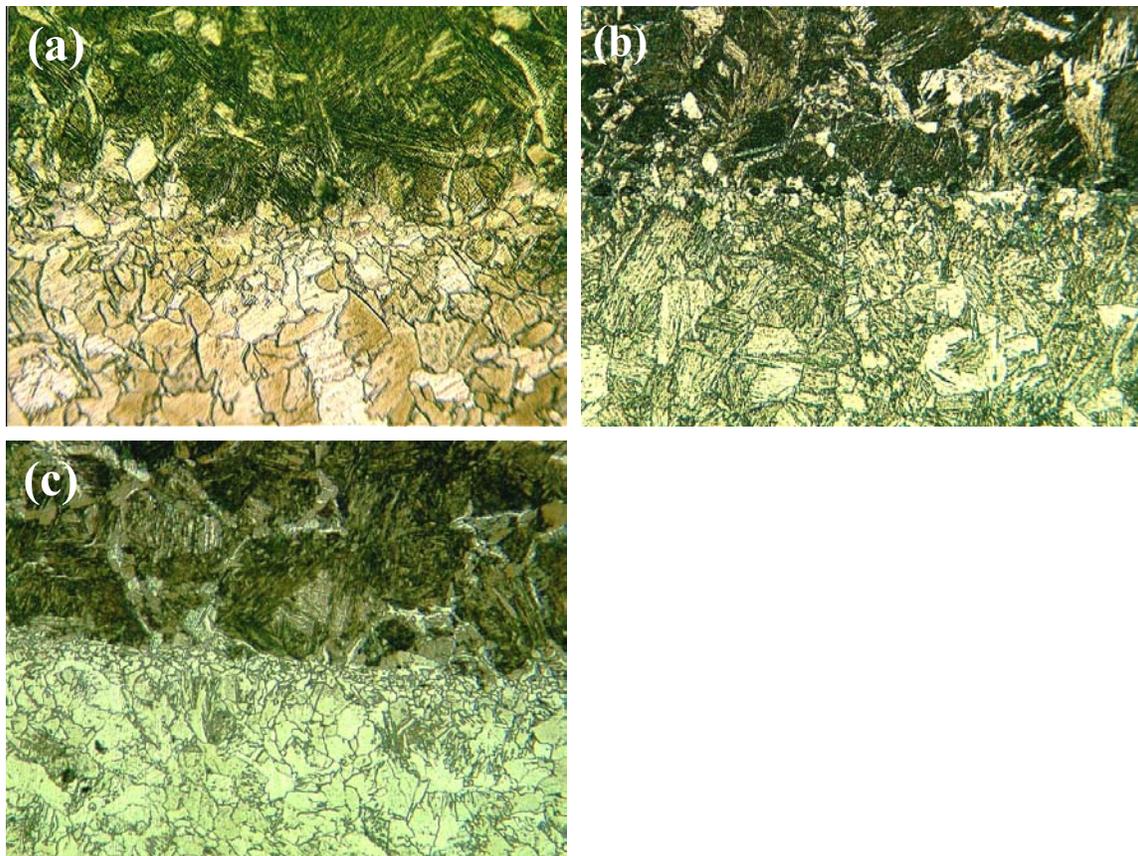


Figura 6. Microestruturas representativas das amostras analisadas.

A Figura 6 (a) mostra uma microestrutura referente à amostra MET031472 composta por ferrita e cementita modificada pelo calor na ZAT e bainita, martensita e ferrita acicular na lente de solda. Já na Figura 6 (b) nota-se a microestrutura da amostra MET031351 composta por bainita, martensita e ferrita acicular na lente de solda e na ZAT. A Figura 6 (c) mostra uma microestrutura intermediária na ZAT composta por um misto entre o observado anteriormente e com a lente de solda repetindo as microestruturas anteriores.

De acordo com a Tabela 2, as amostras podem ser agrupadas conforme a microestrutura apresentada. Nota-se que a área de trapézio equivalente (T_e) das amostras com vazamento são menores que as demais, mas muito próxima das amostras que apresentaram microestrutura considerada normal nos lotes sem vazamento. Nesse caso fica claro que apesar de um T_e reduzido – menor seção resistente – certamente foi a microestrutura que teve papel importante, pois as amostras com vazamento possuem microestrutura frágil.

Tabela 2. Principais parâmetros das soldas dos lotes 4 e 5 (sem defeitos), classificados de acordo com a microestrutura encontrada na zona afetada termicamente (ZAT) em comparação com os parâmetros médios dos lotes com vazamento.

Amostra	L	D	Da	Dez	P	Ls	Lm	Dm	Dam	Dzm	Pm	LSm	Te	MICRO-ESTRUTURA ZAT
1468	3,22	0,67	0,22	0,53	0,11	2,2								BAINITA/MARTENSITA
1469	5,00	0,93	0,21	1,00	0,57	1,1								
1471	4,33	0,89	0,28	1,06	0,33	2,2	4,39	0,77	0,22	0,90	0,31	1,66	2,17	
1484	4,89	0,67	0,11	0,86	0,44	1,1								
1490	4,50	0,70	0,25	1,05	0,10	1,7								
	L	D	Da	Dez	P	Ls	Lm	Dm	Dam	Dzm	Pm	LSm	Te	
1472	3,9	0,9	0,3	0,6	0,3	2,2								NORMAL
1478	3,6	0,8	0,2	0,8	0,3	1,1								
1480	3,6	0,8	0,1	0,5	0,3	1,7	3,9	0,7	0,2	0,8	0,3	2,12	1,71	
1481	3,7	0,5	0,2	0,9	0,3	2,2								
1486	4,0	0,8	0,1	1,0	0,2	3,3								
1489	4,4	0,7	0,1	0,9	0,2	2,2								
	L	D	Da	Dez	P	Ls	Lm	Dm	Dam	Dzm	Pm	LSm	Te	
1470	4,00	1,00	0,22	0,57	0,33	1,1								INTERMEDIÁRIA
1473	4,13	0,38	0,25	1,38	0,31	1,1								
1474	4,22	0,89	0,22	0,56	0,44	3,9								
1476	4,11	0,78	0,22	0,43	0,33	2,8								
1477	4,44	1,67	0,17	0,02	0,50	3,9								
1479	3,89	0,89	0,28	1,00	0,33	2,2								
1482	3,80	0,50	0,30	0,60	0,40	2,2	4,17	0,77	0,21	0,73	0,33	2,31	2,04	
1483	4,11	0,56	0,22	0,97	0,33	1,1								
1485	4,20	0,60	0,20	0,90	0,30	2,2								
1488	4,30	0,60	0,20	0,60	0,25	1,7								
1491	4,30	0,70	0,10	0,80	0,20	3,3								
1493	4,56	0,67	0,11	0,97	0,22	2,2								
Lotes com vazamento							Lm	Dm	Dam	Dzm	Pm	LSm	Tem	B/M
							3,95	0,75	0,10	0,88	0,43	2,9	1,68	

Assim, a qualidade da junta soldada é uma função da microestrutura da solda, ou seja, na lente de soldagem e na ZAT, e das dimensões da lente de soldagem, sendo que tais características são dependentes dos parâmetros de processo utilizados.

4 CONCLUSÕES

As falhas ocorridas na soldas de amortecedores são decorrentes do tipo de microestrutura formada na junta soldada, tanto na lente de soldagem como na ZAT. A formação da microestrutura está relacionada com o aporte térmico durante o

processo de soldagem, assim uma das maneiras de se controlar a microestrutura formada é a através do monitoramento e controle dos parâmetros de processo.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos técnicos do laboratório de metalografia do CCDM/UFSCar pela preparação de amostras e ao CNPq pela concessão da bolsa de doutorado.

Referências Bibliográficas

1. American Welding Society, AWS HANDBOOK, volume 2, 1993.
2. MACHADO, I. G. **Soldagem e Técnicas Conexas**: Processos. Porto Alegre: Editado pelo autor, 1996.
3. THORNTON, P.; KRAUSE, A.; DAVIES, G. The Aluminum Spot Weld. **Welding Journal**. v. 75, n. 3, p. 101-108, 1996.
4. TALAT 2.0 CD ROOM - Training in Aluminium Application Technology, European Aluminum Association. 1999.

FAILURE ANALYSIS IN RESISTANCE SEAM WELDS⁽¹⁾

Camilo Bento Carletti⁽²⁾
Cleber Ricardo Chinaglia⁽³⁾
Nelson Guedes de Alcântara⁽⁴⁾
Claudemiro Bolfarini⁽⁵⁾

Abstract

The objective of this work is to discuss the influence of the microstructure and of the nugget size on the possibility of failure in lap joints welded by seam welding process. The final microstructure was characterized through optical microscopy, and the macrostructure was observed to verify the presence of defects. The results showed that the microstructures were more important in the performance of the joints than the size of the lenses.

Key-words: Seam welding; Failure analysis; Microstructure.

¹ 60º Congresso Anual da ABM, 25 e 28 de julho de 2005, Belo Horizonte.

² Doutorando do PPG-CEM / DEMa - UFSCar. Rod. Washington Luiz Km 235 – 13565-905 – São Carlos – SP.

³ Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais – CCDM/UFSCar.

⁴ Professor adjunto do DEMa - UFSCar e Diretor Executivo do CCDM.

⁵ Professor adjunto do DEMa - UFSCar e Gerente Geral do CCDM.