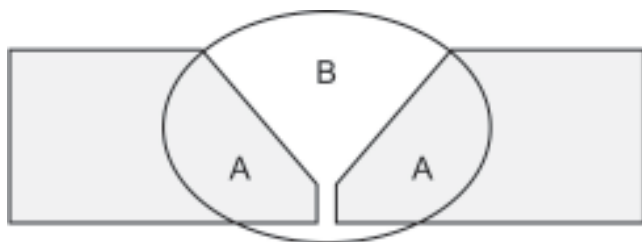


"Na soldagem por fusão chama-se **DILUIÇÃO** a parcela de metal de base que entra na composição da zona fundida (*metal de solda*). Para a maioria das aplicações (*em aços de baixo carbono*) a diluição apresenta pequena importância no que diz respeito ao comportamento da junta em serviço, porém em algumas aplicações "especiais" esta característica pode ser determinante na performance do componente, podendo inclusive favorecer falhas durante a operação do equipamento, sem que o problema - elevada diluição - possa ser detectado durante a fabricação. Neste artigo apresentaremos algumas situações onde a possibilidade de elevada diluição deve ser avaliada antes da seleção, qualificação e execução de um procedimento de soldagem."

Annelise Zeemann

Diluição

A diluição é a quantidade percentual de metal de base que entra na composição do metal de solda, na soldagem por fusão, podendo variar desde valores muito baixos como 5% até 100% na soldagem autógena (sem metal de adição). A figura 1 ilustra esta característica em um esquema da seção transversal de uma junta soldada.



$$\text{Diluição (\%)} = \frac{\text{área A}}{\text{áreas A} + \text{B}}$$

Figura 1 Diluição

Dependendo do procedimento utilizado - tipo de junta, processo, temperatura de pré-aquecimento, consumíveis, parâmetros elétricos - podem existir grandes variações no valor da diluição, sendo entretanto que as principais condições de **diluição elevada** ocorrem para:

- **Soldagem de raiz**, pela própria configuração da junta (figura 2);
- **Soldagem segundo processos de elevada energia**, como o arco submerso por exemplo;
- **Técnicas de soldagem que favoreçam maior penetração**, como apontar o arco elétrico diretamente para o metal de base (ao invés de apontar para a poça de fusão) como na soldagem GMAW (MIG-MAG) empurrando (forehand), ou segundo **processos manuais** onde a fusão do metal de base é independente da adição do consumível, como o GTAW (TIG) onde o soldador funde quanto material de base quiser (podendo inclusive ser autógena);
- Utilização de **alta temperatura de pré-aquecimento**, pois a fusão do metal de base fica facilitada;
- Parâmetros ou consumíveis de soldagem que favoreçam **alta penetração**, como por exemplo soldagem GMAW (MIG-MAG) com CO₂.



Figura 2 Elevada diluição na raiz.

Como anteriormente mencionado, a maioria das aplicações de soldagem de união em aços estruturais e em aços de construção mecânica de baixo carbono não apresenta qualquer tipo de problema independente do valor da diluição, pois os consumíveis utilizados, sejam varetas, arames ou eletrodos, são totalmente "similares" ao metal de base.

O que significa uma **soldagem similar** ??

É a soldagem realizada entre dois materiais cujas composições são próximas (apesar de nunca serem iguais) utilizando um consumível sólido cuja composição também apresenta mesmas características, sempre com uma resistência mecânica um pouco mais elevada do que a do metal de base. Por exemplo quando se solda tubos de ASTM A 106 grau A (produto tubular sem costura de aço ao carbono, ou seja sem elementos de liga, com no máximo 0,25% de carbono e limite de resistência mínimo de 48 ksi) com eletrodo revestido tipo AWS E 6010 (consumível de aço ao carbono cujo metal depositado oferece limite de resistência mínimo de 60 ksi). Outro exemplo é a soldagem de chapas de aço inoxidável austenítico tipo AISI 304 utilizando arame AWS ER 308.

Porém, quando a soldagem é dissimilar, ou seja um dos materiais de base ou o consumível apresenta composição diferente dos demais, podem começar a existir os problemas de elevada diluição.

Algumas aplicações óbvias de **soldagem dissimilar** são os revestimentos contra **corrosão** ou contra **desgaste**. No caso da **soldagem de revestimentos** o consumível é quase sempre de composição diferente do metal de base e os elementos de liga presentes são bem balanceados para garantir o efeito desejado. Considerando que o metal de base normalmente é de aço ao carbono (cujo elemento em abundância é o ferro) fica claro que se houver uma diluição elevada do metal de base o depósito pode não favorecer a resistência necessária. Os quadros I e II apresentam exemplos de efeitos indesejáveis causados por diluições excessivas em revestimentos.

Outra aplicação de **soldagem dissimilar** ocorre quando são utilizados metais de base diferentes devido à necessidade de uma característica específica em uma dada região do equipamento, como por exemplo em uma caldeira onde em baixa temperatura se utilizam tubos de aço ao carbono, enquanto regiões mais quentes exigem aços ao cromo-molibdênio ou mesmo aços inoxidáveis austeníticos (de alto carbono). Neste

caso, não somente deve-se procurar minimizar a diluição através de um procedimento bem estudado para a aplicação específica, como deve-se dar especial atenção ao tipo de consumível a ser adotado, que deve "acomodar" as composições totalmente diferentes dos metais de base. Um exemplo é a utilização de ligas de níquel tipo Inconel para a soldagem entre tubos de aço inoxidável austenítico e aço cromo-molibdênio.

Existem ainda situações onde a soldagem não é considerada dissimilar (pois são todos aços baixa liga) mas com certeza a diluição é um fator a ser considerado. É o caso da soldagem de materiais um pouco mais "incrementados" da indústria mecânica, como aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) ou aços ultra-resistentes, tipo AISI 4140 ou AISI 5160 (com carbono mais alto). A diluição de determinados elementos de liga ou de carbono do metal de base no metal de solda pode promover efeitos catastróficos, e para melhor explicar este problema serão brevemente apresentadas as formas metalúrgicas de conferir resistência mecânica aos materiais de base, e à solda.

O **metal de base** a ser soldado é quase sempre um produto siderúrgico semi-acabado que apresenta características de processamentos múltiplos na própria usina, ou seja (exceto para os fundidos) as chapas, tubos, barras, blocos forjados entre outros, passam por *processos de conformação mecânica* e por *ciclos térmicos* que, juntamente com composições químicas balanceadas (elementos de liga e carbono), permitem processos metalúrgicos (como precipitações e recristalizações) cujos efeitos podem conferir propriedades de resistência mecânica e tenacidade específicas. Dessa forma existem aços microligados ao Nb, V e Ti, de estrutura ferrítica ultra refinada que apresentam alta resistência e alta tenacidade, cujos efeitos dos elementos microligantes ocorrem principalmente durante processos de conformação em temperaturas controladas. Ou existem barras de aço ultra-resistente tipo AISI 4140 (com carbono na ordem de 0,4% e cromo na ordem de 1%) que, depois de forjadas, trepanadas e usinadas, são beneficiadas com têmpera e revenimento em temperaturas controladas para atingir limite de resistência de até 130 ksi com uma estrutura basicamente martensítica. Estes exemplos evidenciam como, para garantir a resistência mecânica no metal de base, podem ser utilizados diversos tipos de processamento mecânico e de tratamentos térmicos, bem controlados, em aços cuja composição química pode ser a mais abrangente possível, com os teores de carbono mais variados.

Já no caso de consumíveis de solda a coisa se modifica um pouco, pois a resistência mecânica do **metal de solda** deve ser garantida na forma de *como-fundido* ou no máximo com um tratamento térmico de alívio de tensões, que na maioria das vezes até piora em termos de resistência mecânica. E o carbono é sempre limitado a valores muito baixos (na ordem de 0,12%) para garantir a boa soldabilidade do consumível. Logo, percebe-se que para atingir elevada resistência mecânica (por exemplo 110ksi), os consumíveis apresentam-se muito "ligados" (com grande quantidade de elementos de liga), e muitas vezes até mesmo pequenas modificações nos parâmetros de soldagem, em relação aos parâmetros determinados pelo fabricante, podem impossibilitar a obtenção da resistência necessária. Agora, imaginem os efeitos de diluições excessivas nesse balanço de composições.

Por exemplo, se for realizada a soldagem multipasse de um aço microligado ao nióbio com um procedimento que favoreça muito alta diluição, pode haver o trincamento intergranular por reaquecimento do metal de solda ainda durante a soldagem, pelo aquecimento dos passes subsequentes, pois o nióbio precipita em "baixa" temperatura causando um endurecimento adicional da estrutura e concentrando deformações em contornos.

Outro exemplo é a soldagem de produtos tubulares de aços ultra-resistentes de médio carbono, por exemplo o AISI 4140, onde propositadamente utiliza-se consumíveis de menor resistência mecânica na raiz, pois é uma região de alta restrição (grande tensionamento residual) e de alta diluição, onde o carbono do metal de base pode causar endurecimento excessivo da solda e promover o trincamento ainda durante a soldagem. Inclusive dependendo das condições gerais de diluição da solda (principalmente da espessura do material e do tipo de projeto de junta) pode-se realizar toda a soldagem somente com consumível de resistência mecânica um pouco menor do que a do metal de base, pois a própria diluição do carbono do metal de base se responsabilizará pela alta resistência mecânica da solda.

Finalmente, cabe mencionar que a proposta deste artigo foi apenas a de evidenciar situações onde muitas vezes não estamos preocupados com a diluição, mas deveríamos estar. Neste caso, perder um pouco mais de tempo para selecionar um procedimento que

minimize a diluição (cordões pequenos e filetados, técnicas de menor penetração) ou consumíveis capazes de acomodar melhor as diluições, treinar soldadores e criar as condições de melhor controle durante a soldagem, podem ser boas opções.

QUADRO I

Revestimento Contra Desgaste

Existe um sem número de revestimentos protetores contra desgaste, com composições muito controladas para promover a resistência a um tipo de específico de mecanismo de desgaste, que pode ser **abrasivo** (metal x partículas duras); **erosivo** (metal x fluidos) ou **metal x metal**, sendo que cada mecanismo ainda se subdivide em vários, como por exemplo desgaste erosivo por cavitação, por "impingment", erosão abrasiva, entre outros. Por isso a forma de qualificar os procedimentos de soldagem de revestimentos contra desgaste são muito "abertas" e não existe, segundo os códigos usuais de qualificação, um requisito de composição química que possa auxiliar o controle da **diluição**, verdadeira inimiga da soldagem de revestimentos.

O exemplo escolhido mostra um revestimento contra desgaste metal x metal do tipo austenítico ao manganês, cuja propriedade é garantida pelo encruamento da austenita em serviço. A estabilidade da estrutura austenítica neste tipo de revestimento é promovida pelos elevados teores de manganês (maior do que 13%) e de carbono. Se o procedimento de soldagem adotado favorece grande diluição, o ferro do metal de base entra no revestimento, reduzindo o teor de manganês, o que causa uma desestabilização da austenita, transformando-a em martensita e favorecendo a formação de pontos localizados de estrutura endurecida e fragilizada, que rapidamente são arrancados da superfície no momento em que o componente é colocado em serviço reduzindo assim a vida do revestimento. As figuras 3 e 4 apresentam o mesmo consumível soldado com diferentes gases de proteção, que favoreceram diferentes níveis de diluição.

É interessante notar que, apesar de conhecido como revestimento "duro", este tipo de consumível deve promover uma estrutura macia na forma como soldada, somente endurecendo após o encruamento, ou seja, após operação. Se for notado seu endurecimento já na forma como-soldada é certo que a diluição foi excessiva.

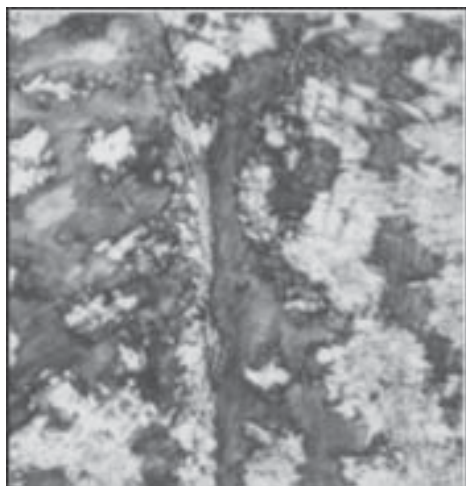


Figura 3 Alta diluição promovendo uma estrutura martensítica com ilhas de austenita e dureza de 570HV 1000x Nital

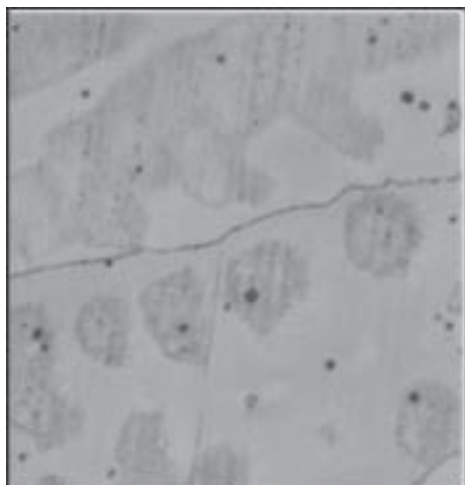


Figura 4 Baixa diluição promovendo uma estrutura austenítica com dureza de 320HV 1000x Nital

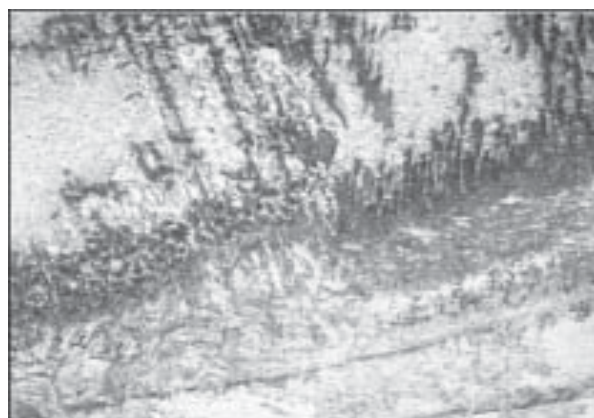
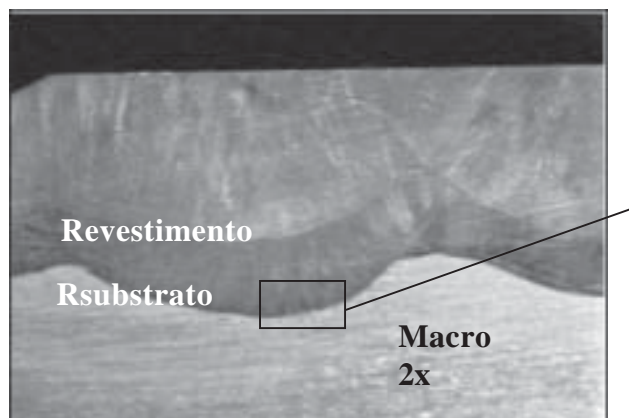


Figura 5 Estrutura martensítica na interface entre o revestimento e o substrato, causada por diluição excessiva

QUADRO II

Revestimento Contra Corrosão

Da mesma forma que os revestimentos contra desgaste, os revestimentos contra corrosão devem apresentar uma composição bem específica para a aplicação a que se destinam. Um exemplo é a soldagem de consumíveis inoxidáveis austeníticos ou ligas de níquel tipo AWS E Ni-Cr-Mo conhecidas como Inconel, sobre equipamentos de aço ao carbono para trabalho em meios agressivos. Neste caso os códigos são um pouco mais "fechados" quanto à composição química do revestimento, que é qualificado para uma dada espessura de qualificação onde a composição do metal de solda deve ser igual à composição do consumível, ou seja, sem que possa haver qualquer diluição com o ferro do substrato. Isto raramente é obtido na primeira camada de revestimento, sendo usual qualificar na segunda camada, se os níveis de diluição tiverem sido adequados. O problema é que nem sempre os fabricantes conferem se o equipamento se apresenta com espessuras de revestimento superiores às qualificadas após a usinagem final, e caso isto não ocorra pode-se esperar corrosão no revestimento, pois sua composição está muito diluída com o ferro.

Outro problema, especificamente quando se solda inox austenítico sobre aço ao carbono, é a camada que se forma na interface devido à elevada diluição do aço ao carbono (sem cromo e sem níquel) no revestimento austenítico (com cromo usual na ordem de 18% e níquel na ordem de 10%). Neste caso a camada de alta diluição pode ficar com uma composição intermediária que corresponde à de um aço martensítico de alta temperabilidade, (figura 5) o que causa muitas vezes o destacamento do cordão depositado com uma simples pancada.