

# ANÁLISE E SIMULAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO RESFRIAMENTO DURANTE O ESTAQUEAMENTO DE UMA JUNTA DE VIGAS DE AÇO ASTM A572 GR. 50\*

Willy Ank de Moraes<sup>1</sup>  
Marcio de Moraes Tavares<sup>2</sup>  
Leandro Ferreira Gomes<sup>3</sup>  
Roberto Santos<sup>4</sup>

## Resumo

O estaqueamento profundo é necessário para obter fundações firmes e confiáveis, mesmo em solos de baixa resistência. Após completar a soldagem entre dois perfis, através do uso de talas, que compõe uma estaca de uma fundação profunda, essa união é inserida, juntamente com o restante da viga, através de uma máquina de estaqueamento. Neste processo a região da emenda pode sofrer choque térmico devido à umidade presente no solo. Este trabalho visa demonstrar a viabilidade da imediata inserção ('cravação') no solo de juntas entre perfis de aço ASTM A572 Grau 50, efetuadas através da operação de soldagem com eletrodo revestido (E 7018), simulada através de uma condição de maior criticidade pelo processo de arame tubular.

**Palavras-chave:** Soldagem; Vigas de Aço; Eletrodo Revestido; Fundações profundas; Resfriamento acelerado.

## ANALYSIS AND SIMULATION OF THE COOLING INFLUENCE DURING STACK DRIVING ON A WELDED CONNECTION OF ASTM A572 GR. 50 STEEL BEAMS

## Abstract

The deep staking is required to obtain firm and reliable foundation even in soils of low resistance. After completing the welding between two beams, with the aid of connection splices, that compose a stake (pale) of a deep foundation, this union is inserted, along with the rest of the beam by a piling machine. In this process the welded region may suffer thermal shock due to moisture in the soil. This work demonstrates the feasibility of immediate insertion ('spiking') on the ground of joints between steel beams ASTM A572 Grade 50, made by welding operation with a SMAW electrode (E 7018), which was simulated by a condition more critical process by cored wire.

**Keywords:** Welding; Steel beams; SMAW; Deep foundations; Accelerated Cooling.

<sup>1</sup> *Doutorando, Mestre, Engenheiro e Técnico em Metalurgia e Materiais, Sócio-Diretor da Willy Ank Soluções Metal-Mecânicas, Professor Mestre da UNAERP-Guarujá e Professor Adjunto da Universidade Santa Cecília (UNISANTA), Santos, SP, Brasil (wmorais@unaerp.br).*

<sup>2</sup> *Engenheiro Químico, Mestre em Engenharia Mecânica, Doutorando em Engenharia Química, Coord. do Curso de Eng. Civil e de pós graduação em Eng. de Segurança do Trabalho da UNAERP, Guarujá, SP, Brasil (mtavares@unaerp.br).*

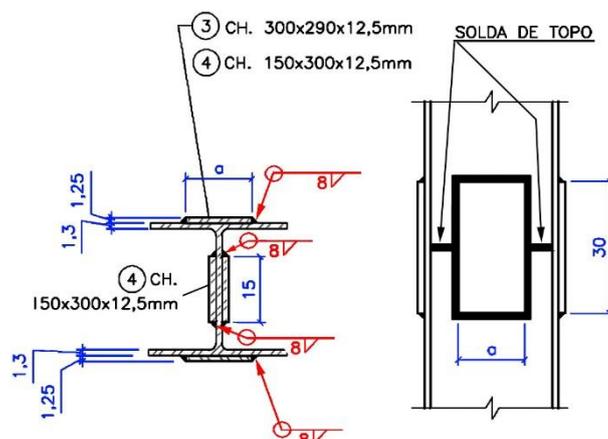
<sup>3</sup> *Mestre em Engenharia Mecânica, Engenheiro Mecânico, Assistente de Engenharia na Engenharia de Manutenção da Usiminas, Cubatão, SP, Brasil (eng.leandrogomes@live.com).*

<sup>4</sup> *Mestrando, Engenheiro e Técnico em Mecânica, Professor Titular do Curso Técnico em Mecânica, ETEC "Aristóteles Ferreira" e Professor titular dos Cursos Técnicos em Metalurgia e Segurança do Trabalho "Dona Escolástica Rosa", Santos, SP, Brasil (r.mendes.santos@r7.com).*

## 1 INTRODUÇÃO

O estaqueamento profundo é necessário para obter fundações[1] firmes e confiáveis, mesmo em solos de baixa resistência. Neste caso, as estacas empregadas nas fundações precisam ser cravadas até encontrar um leito rochoso estável, que pode estar localizado em uma grande profundidade, conforme indicado por sondagens geotécnicas realizadas previamente. Como são empregadas vigas de aço de alta resistência, geralmente ASTM A572 Gr.50[2] com 12m de comprimento, torna-se necessário a união adequada destas vigas entre si, até atingir o leito rochoso estável.

As vigas empregadas no estaqueamento possuem, tipicamente, a geometria “H” e a união destas vigas, pode ser parafusada ou soldada. Em ambos os casos, esta união deve ser realizada em conformidade com a norma brasileira de execução de fundações: ABNT NBR 6122[1]. Quando são empregados processos de soldagem elétrica, soldam-se 2 (duas) talas nas almas e 2 (duas) talas nas abas destes perfis conforme mostrado na Figura 1.



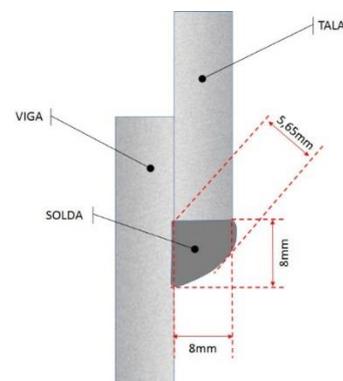
**Figura 1.** Especificação da junta soldada empregada na experiência feita no CENTRO DE SOLDAGEM – INSPE///BRAS®. O valor 8 é a dimensão da perna mínima da solda (o que equivale a uma garganta de 5,65mm).

Após completar a soldagem de uma união, essa é inserida, juntamente com o restante da viga, através de uma máquina de estaqueamento. Neste processo o metal depositado pela soldagem e a Zona Termicamente Afetada (ZTA) na região da emenda pode sofrer choque térmico devido à umidade presente no solo do local do estaqueamento. Este choque térmico, quando ocorre, pode ser em maior ou menor grau, especialmente em função da temperatura da solda, e pode causar um efeito deletério em função da composição química e estrutura desejada dos componentes em aço envolvidos. A susceptibilidade deste choque térmico torna-se mais preocupante quando o processo de soldagem é executado imediatamente antes da cravação final. Esta condição pode ser potencializada quando é empregado um processo com maior produtividade e aporte metálico como o *FCAW-s*.

O presente trabalho objetiva demonstrar a viabilidade da imediata inserção no solo de juntas entre vigas de aço ASTM A572 Gr.50[2], aço normativamente igual ao ASME SA 572/572M[3], realizada através da operação de soldagem com eletrodo E 7018[5], normativamente coberto pela norma ASME SFA-5.1[4], considerando a pior situação na qual o solo encontra-se saturado em água (com grande umidade) e que a junta não deve apresentar prejuízo de desempenho em nenhuma região da emenda obtida, conforme especificado e esperado pelas normas e procedimentos aplicáveis.

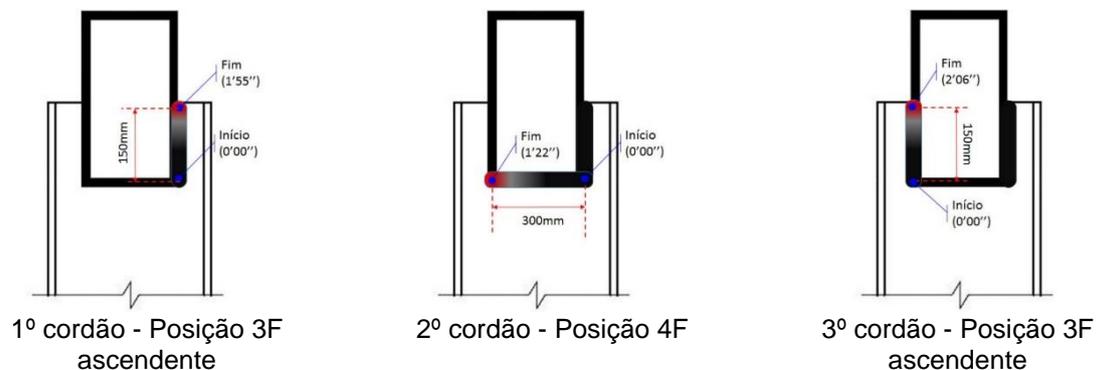
## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Uma junta soldada igual à mostrada na Figura 1 foi preparada para ser executada pelo processo de arame tubular auto protegido com arame ASME SFA-5.20[9]. Todo o procedimento foi acompanhado por um inspetor de solda Nível 1 (especializado na norma AWS). A soldagem foi feita sobre uma bancada posicionada ao lado de um tanque com água, conforme ilustrado na Figura 2. O processo foi executado de tal forma que os cordões de solda, conforme especificado pela Figura 1 (perna mínima de 8mm e garganta de 5,65mm), foram depositados em uma tala durante um intervalo de tempo pequeno. Após o depósito das soldas o conjunto foi parcialmente imerso em água a temperatura ambiente (20°C) de tal forma que metade da junta obtida, mostrada na Figura 1, ficou completamente submersa na água enquanto que a outra resfriou ao ar.



**Figura 2.** À esquerda: montagem experimental criada no CENTRO DE SOLDAGEM – INSPE//BRAS® para simular as piores condições de soldagem em campo de juntas empregadas em estaqueamento profundo. À direita: detalhe do depósito de solda feita para unir a tala à viga (perna mínima de 8mm e garganta de 5,65mm).

O procedimento foi filmado do início ao fim, de tal forma que que foi possível registrar não apenas os tempos de execução da junta soldada durante a experiência, mas também as medições de temperatura. A Figura 3 ilustra a sequência de depósito das juntas soldadas, a posição e direção nas quais foram executadas. A Tabela 1 resume os principais momentos da experiência e o momento em que cada uma ocorreu, conforme registrado em filmagem.



**Figura 3.** Sequência de depósito dos cordões de solda na experiência realizada no CENTRO DE SOLDAGEM – INSPE//BRAS® para simular as piores condições de soldagem em campo de juntas empregadas em estaqueamento profundo.

**Tabela 1.** Principais eventos da experiência realizada no CENTRO DE SOLDAGEM – INSPE//BRAS® para simular as piores condições de soldagem em campo de juntas empregadas em estaqueamento profundo.

Evento	Horário	Ilustração
Início do processo	0'0"	
Término do 1º cordão	1'55"	
Início do 2º cordão	2'19"	
Término do 2º cordão	3'41"	
Início do 3º cordão	4'04"	
Término do 3º cordão	6'10"	

Início da imersão em água	6'38"		
Término da imersão em água	6'40"		

Várias medições de temperatura foram obtidas através de um pirômetro infravermelho manual Minipa MT-350 (INSPE///BRAS TAG 012) calibrado (faixa de -30 a 550°C com precisão de  $\pm 2\%$ ). A amostra de viga, tala, arame e água encontravam-se à temperatura ambiente (cerca de 20°C no dia no qual a experiência foi realizada). A Figura 4 ilustra os valores máximos de temperatura medidos no metal ao redor da poça de fusão bem próximo aos cordões de solda depositados (vide Fig.3).



1º cordão - 409°C

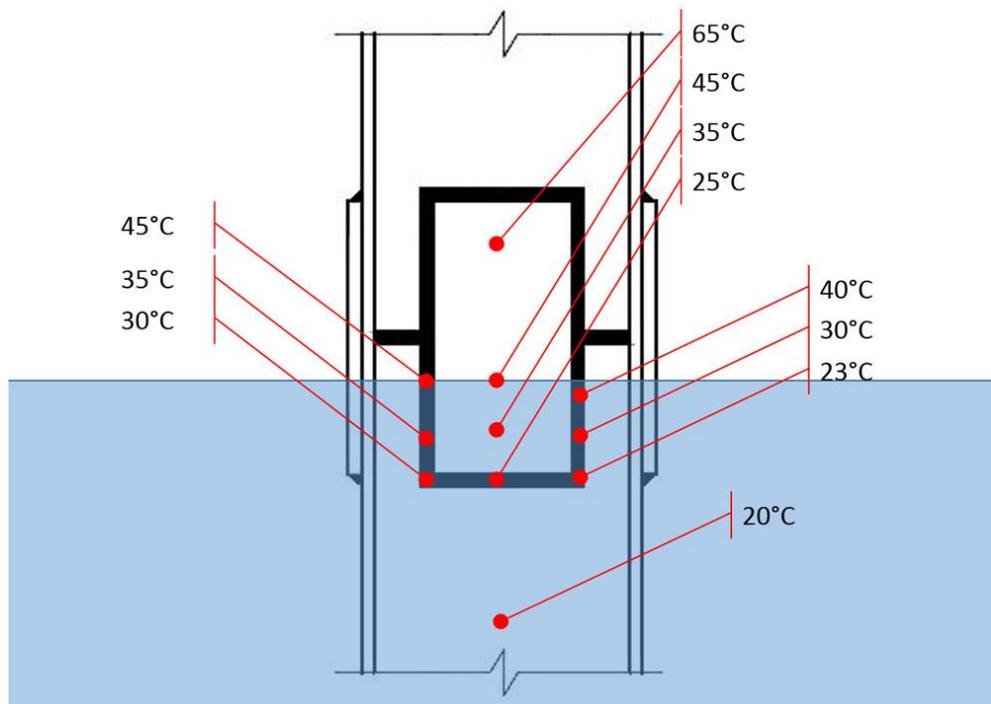


3º cordão - 323°C

**Figura 4.** Temperaturas registradas durante a experiência realizada no CENTRO DE SOLDAGEM – INSPE///BRAS® para simular as piores condições de soldagem em campo de juntas empregadas em estaqueamento profundo.

Após a soldagem o conjunto foi imerso parcialmente em água, contida dentro de um tanque próximo (vide Fig. 2). O intervalo de tempo entre o final da soldagem e a imersão parcial na água do tanque foi de apenas 30 segundos ou meio minuto (vide Tab. 1). A Figura 5 ilustra a posição da linha d'água na amostra, neste caso o objetivo foi deixar uma parte da amostra com menor efeito do resfriamento para averiguar diferenças de comportamento.

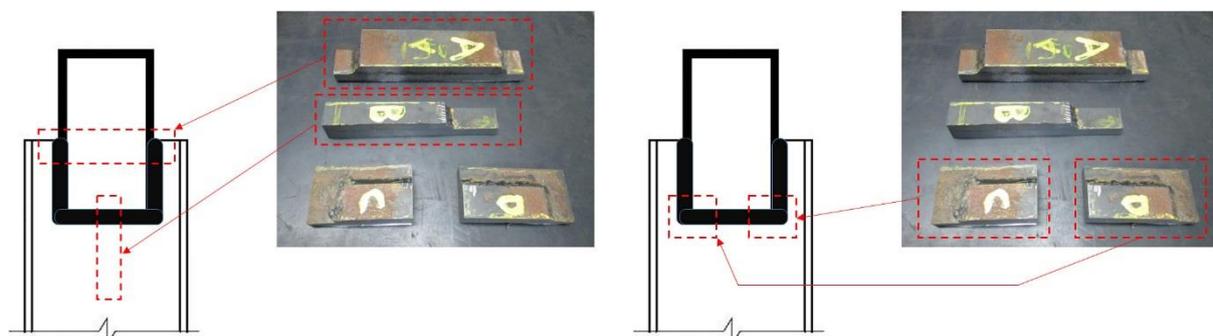
O perfil de temperaturas na emenda simulada, verificadas com o pirômetro infravermelho após a retirada da amostra do tanque com água, está ilustrada na Figura 5. A retirada do tanque ocorreu 10 minutos depois da imersão. O processo de medição da temperatura foi registrado em vídeo, tal como feito durante o processo de soldagem e ilustrado na Figura 4.



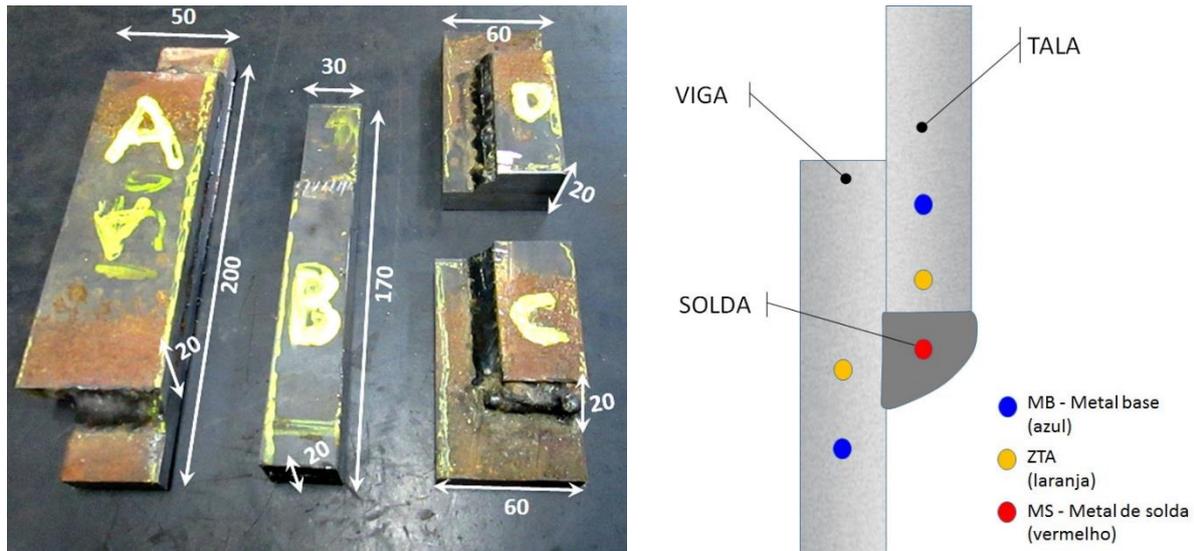
**Figura 5.** Perfil de temperaturas registradas após o término da experiência (resfriamento) realizada no CENTRO DE SOLDAGEM – INSPE///BRAS® para simular as piores condições de soldagem em campo de juntas empregadas em estaqueamento profundo. A região inferior (em azul) foi imersa em água a temperatura ambiente por 10 minutos.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o término da simulação da soldagem, amostras da emenda produzida foram cortadas nas posições e geometrias mostradas na Figura 6 e nas dimensões aproximadas como mostrado na Figura 7. Cada uma das amostras contém regiões do metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) pelo calor do metal de solda (MS), conforme ilustrado na Figura 7.



**Figura 6.** Posição das amostras retiradas da emenda obtida na experiência realizada no CENTRO DE SOLDAGEM – INSPE///BRAS® para simular as piores condições de soldagem em campo de juntas empregadas em estaqueamento profundo.



**Figura 7.** Geometria, identificação, tamanho e regiões contidas nas amostras retiradas da emenda obtida na experiência realizada no CENTRO DE SOLDAGEM – INSPE///BRAS® para simular as piores condições de soldagem em campo de juntas empregadas em estaqueamento profundo.

Pela posição da amostragem, as amostras que foram retiradas das regiões totalmente imersas da emenda foram três: 'B', 'C' e 'D'. A amostra 'B' foi a amostra que reteve a maior quantidade de calor, por ter mais regiões vizinhas de metal depositado. Finalmente a amostra 'D' foi a que sofreu menor resfriamento antes da imersão em água.

Medições de dureza Brinell, em conformidade com a norma ASTM E10[10], foram feitas nas amostras retiradas da emenda simulada nesta experiência nas três regiões da amostra, conforme ilustrado na Figura 6. As medições de dureza foram feitas nos laboratórios da SGS Labmat através de um durômetro analógico para gerar a impressão a 10kgf de carga e através de um projetor de perfis para obter a área da impressão.

Os resultados diretos das medições de dureza estão ilustrados na Tabela 2, assim como os resultados obtidos de limite de resistência (SLR) e de dureza Rockwell (escala C), convertidos a partir dos valores de dureza Brinell pela norma DIN EN ISO 18265[8]. Deve-se lembrar que os valores convertidos possuem uma certa imprecisão e devem ser tomados como referência para comparação entre os resultados apenas.

**Tabela 2.** Resultados da medição da dureza Brinell nas amostras retiradas da emenda obtida na experiência realizada no CENTRO DE SOLDAGEM – INSPE///BRAS® para simular as piores condições de soldagem em campo de juntas empregadas em estaqueamento profundo.

Posição	Amostra	Região	HB	SLR (MPa)*	HRc*
	'A'	MB (1)	175	591	3,0
	'A'	ZTA (2)	191	645	9,7
	'A'	MS (3)	218	736	17,9
	'A'	ZTA (4)	196	662	11,4
	'A'	MB (5)	175	591	3,0
	'B'	MB (1)	171	577	1,0

'B'	ZTA (2)	198	668	12,1
'B'	MS (3)	235	793	21,7
'B'	ZTA (4)	219	739	18,1
'B'	MB (5)	169	571	0,0
'C'	MB (1)	170	574	0,5
'C'	ZTA (2)	181	611	5,7
'C'	MS (3)	211	712	16,1
'C'	ZTA (4)	214	722	16,9
'C'	MB (5)	173	584	2,0
'D'	MB (1)	173	584	2,0
'D'	ZTA (2)	187	631	8,1
'D'	MS (3)	220	742	18,4
'D'	ZTA (4)	212	716	16,3
'D'	MB (5)	178	601	4,3

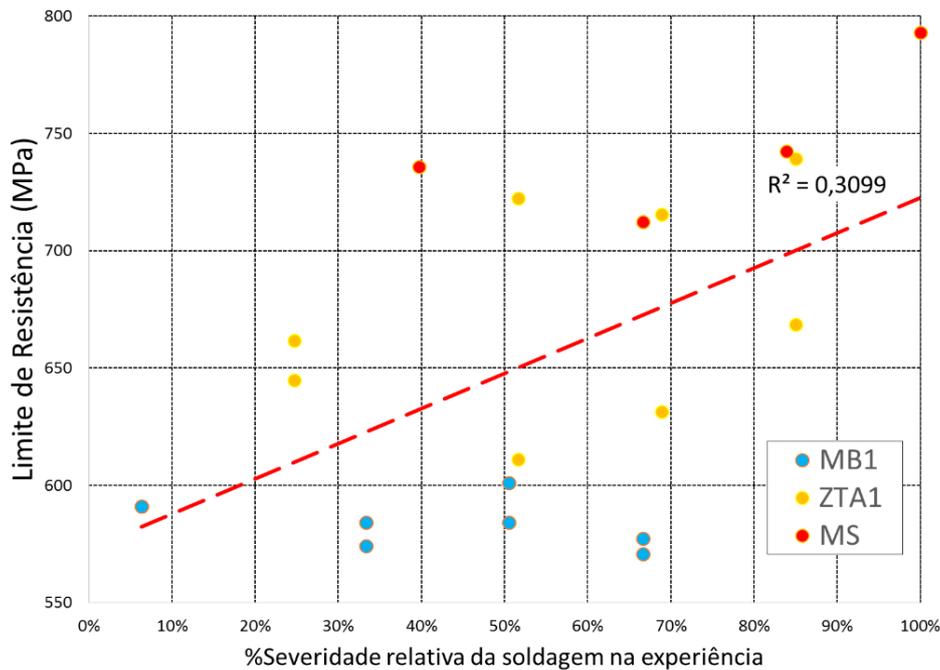
	MB	ZTA	MS
MÉDIAS	173 HB	200 HB	221 HB
	2 HRc	12 HRc	19 HRc
	S <sub>LR</sub> 584 MPa	S <sub>LR</sub> 674 MPa	S <sub>LR</sub> 746 MPa
NORMAS	> 450 MPa[2]	–	

\* Valores obtidos por conversão conforme norma DIN EN ISO 18265[8].

Atribuindo um grau de severidade adequado para cada condição é possível descrever os valores de dureza em função da severidade submetida à região. Neste caso, adotou-se os seguintes graus de severidade de 0 a 100% (do menos ao mais severo):

1. **Imersão em água:** mínima (região 'A') para não imerso e máxima para imerso (demais regiões).
2. **Variação térmica:** mínimas para a amostra 'C' e 'A'; média para a amostra 'D' e máxima para a amostra 'B'.
3. **Região da solda:** mínima para o MB (Metal Base), média para a ZTA (Zona Termicamente Afetada) e máxima para o MS (Metal Solda).

Empregando estas três definições é possível obter um gráfico correlacionando os valores de dureza medidos com a severidade definida como descrito anteriormente. Usando estes valores é possível obter o gráfico mostrado na Figura 8, que apresenta uma correlação linear pobre entre estes valores, conforme apresentado pelos baixos valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) (0,31).



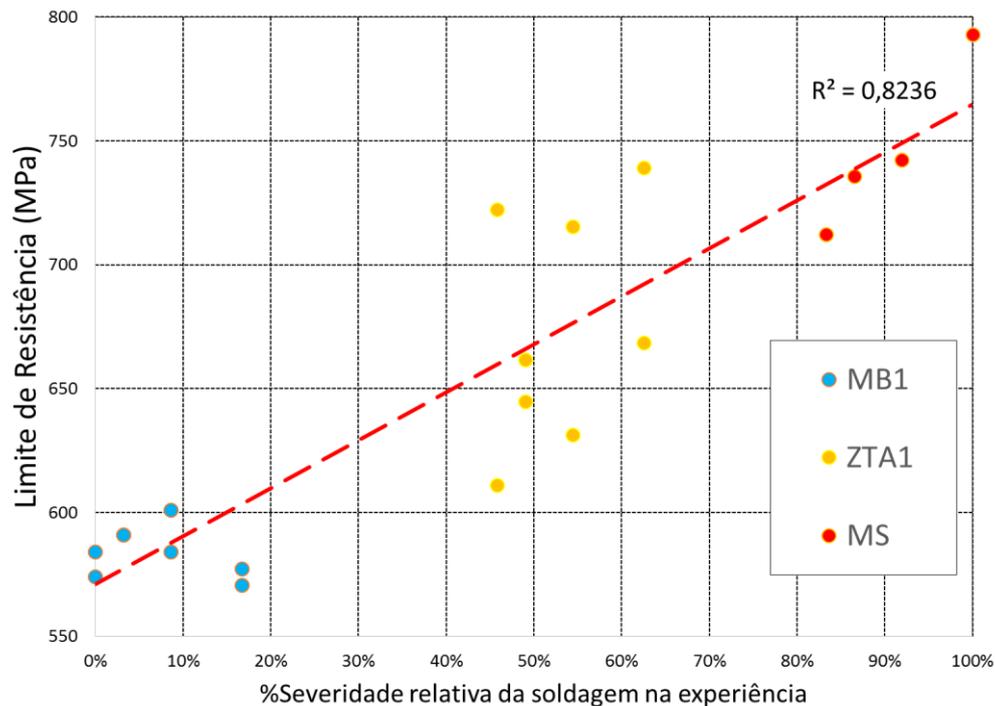
**Figura 8.** Tentativa de associação entre as condições de soldagem (severidade) com os valores de dureza obtidos nas amostras retiradas da emenda obtida na experiência realizada no CENTRO DE SOLDAGEM – INSPE///BRAS® para simular as piores condições de soldagem em campo de juntas empregadas em estaqueamento profundo.

Revedo os pesos na participação das três variáveis, porém sem mudar os critérios dentre de cada conjunto conforme mostrado na Tabela 3, foi possível obter uma correlação linear melhor entre os valores das novas severidades calculadas com os valores de dureza medidos. Esta melhoria pode ser observada no gráfico da Figura 9, cuja regressão linear apresenta valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) melhores (0,82).

**Tabela 3.** Alteração do peso das variáveis da simulação da soldagem.

Avaliação	Imersão em água	Varição Térmica	Região da solda	$R^2$
Direta	33%	33%	33%	0,31
Revisada	0%	17%	83%	0,82

Os resultados da avaliação química do metal base e do metal de solda não indicam capacidade de endurecimento por choque térmico devido aos baixos valores de Carbono Equivalente ( $CE_{IIV}$ ) [6] [7] encontrados tanto nas máximas composições químicas permissíveis por norma, quanto em uma composição comercial. Os valores de  $CE_{IIV}$  máximos de 0,40 e 0,30 calculados são considerados relativamente baixos [7].



**Figura 9.** Obtenção de uma boa associação entre as condições de soldagem (severidade) com os valores de dureza obtidos nas amostras retiradas da emenda obtida na experiência realizada no CENTRO DE SOLDAGEM – INSPE///BRAS® para simular as piores condições de soldagem em campo de juntas empregadas em estaqueamento profundo.

Caso estes metais sofressem tratamento de têmpera e gerassem quantidades significativas de fase frágil (Martensita), a dureza encontrada acima de 30HRC seria relativamente elevada.

Durante a simulação da soldagem das emendas, feitas em condições muito mais severas do que as consideradas na prática, as temperaturas alcançadas nas regiões próximas ao metal depositado pela solda não ultrapassaram 450°C, conforme mostrado na Figura 4. Portanto não é possível criar austenitização relevante na região da solda a não ser pelo metal depositado e pela pequena região de diluição entre o metal de solda e a ZTA (Zona Termicamente Afetada).

Os valores de dureza medidos no metal base, na ZTA e no metal de solda são relativamente baixos, equivalendo a limites de resistência abaixo de 750MPa para as partes envolvidas. A associação dos valores de dureza com as condições de soldagem demonstrou que as principais variáveis estão associadas ao procedimento de execução da solda (EPS) e não ao que será feito com a emenda após a soldagem. Uma vez bem executada a solda, mesmo que a emenda seja imersa em água, a influência deste meio é praticamente desprezível em face da altíssima taxa de resfriamento que seria necessária após o término da soldagem para efetivamente criar alguma fase frágil. O tempo decorrido entre o processo de soldagem e a imersão em água, que na simulação foi de apenas 30 segundos, não é suficiente para fragilizar a junta soldada nas condições consideradas neste experimento

## 4 CONCLUSÃO

Com base nos resultados aqui apresentados, graças à composição química dos metais envolvidos na soldagem e pelas condições avaliadas de resfriamento e

temperaturas envolvidas, levantadas em análises laboratoriais, é possível recomendar que uma junta soldada (emenda) de estacas metálicas do aço ASTM A572 Gr. 50 [2] no solo, mesmo que úmido, após a sua imediata soldagem com arame tubular autoprottegido (*FCAW-s*). O mesmo pode ser afirmado para soldagem realizada com consumíveis E 7018, pelo processo *SMAW* já que as condições neste último processo são menos severas do que no processo analisado.

## REFERÊNCIAS

- [1] – ABNT NBR 6122:1996. Projeto e execução de fundações, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996.
- [2] – ASTM A572/A572M:15. Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2015.
- [3] – ASME Sec. II, Part A-2. SA-572/SA-572M. Specification for high-strength low-alloy columbium-vanadium structural steel, AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2013.
- [4] – ASME Sec. II, Part C. SFA-5.1/SFA-5.1M. Specification for carbon steel electrodes for shielded metal arc welding, AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2010.
- [5] – FORTES, C. VAZ, C.T. Apostila de Eletrodos Revestidos. ESAB. 2005. (também disponível em: [http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev1\\_apostilaeletrodosrevestidos\\_ok.pdf](http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev1_apostilaeletrodosrevestidos_ok.pdf) <Acesso em 10/06/2015>).
- [6] – Technical Report IIW doc. IX-535-67, INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING (IIW), 1967.
- [7] – MORAIS, W. A.; DIOGO, C. P. . Características definidoras das aplicações dos aços planos - Parte 2: composição química. REVISTA DO AÇO, São Paulo, p. 42 - 46, 06 out. 2014. (também disponível em: <http://www.revistadoaco.com.br/index.php/revista-do-aco-13> <Acesso em 02/07/2015>).
- [8] – DIN EN ISO 18265. Metallic Materials - Conversion of hardness values. Deutsches Institut für Normung. 2004.
- [9] -ASME Sec. II, Part C. SFA-5.20/SFA-5.20M. Specification for carbon steel electrodes for flux cored arc welding, AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2010.
- [10] – ASTM E10. Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2010.