

III-365 - ESTUDO DA POLUIÇÃO CAUSADA NA ÁGUA PELOS PROCESSOS DE CORTE E SOLDA SUBAQUÁTICAS

Valdir Moreira de Souza⁽¹⁾

Biólogo, Especialista em Saúde e Segurança do Trabalho, Mestrando em Engenharia Ambiental no Programa de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio de Janeiro – PEA/UFRJ. Professor de Biologia da Secretaria Estadual de Educação do Rio de Janeiro – SEEDUC/RJ. Instrutor do Instituto de Tecnologia de Solda Firjan SENAI dos cursos Técnicos e de Aprendizagem Industrial na área de Meio Ambiente.

Jessica Rodrigues Pires da Silva⁽²⁾

Engenheira Química, Mestre em Tecnologias Ambientais e Sustentabilidade pelo Instituto de Tecnologia de Nova Iorque, Doutoranda do Programa de Engenharia Química do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ.

Claudinei de Souza Guimarães⁽³⁾

Engenheiro químico, Mestre em Físico-Química e Doutor em Química pelo Instituto de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro – IQ/UFRJ. Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Bioquímica da Escola de Química da UFRJ, Membro do Corpo Docente Permanente da Pós-Graduação do Programa de Engenharia Ambiental e do Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Biocombustíveis e Petroquímica da Escola de Química da UFRJ.

Eduardo Gonçalves Serra⁽⁴⁾

Engenheiro Industrial, Especialista em Planejamento Econômico pela Warsaw School of Economics (SGPiS). Mestre em Engenharia de Produção Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ e Doutor em Engenharia Oceânica pela COPPE/UFRJ. Atualmente é Professor Adjunto IV da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, e Pró-Reitor de Graduação da UFRJ.

Frederico Ferreira Custódio⁽⁵⁾

Graduando em Engenharia de Produção. Mergulhador Saturado (Profundo), tendo mergulhado na profundidade de 298 metros. Supervisor de Mergulho, especialista em montagem e manutenção de estruturas subaquáticas, especialista em corte e soldagem subaquática, inspetor subaquático Nível 2, certificado pela ABENDI (Associação brasileira de ensaios não destrutivos) nas técnicas de Ensaio Visual, Partícula Magnética, Medição de espessura, Potencial eletroquímico e ACFM. Avaliador especialista do Inmetro da ISO 17020. Membro do comitê de segurança do Mergulho. Membro do comitê técnico da ABENDI. Especialista em Mergulho do Instituto de Tecnologia de Solda Firjan SENAI.

Endereço⁽¹⁾: Rua. São Francisco Xavier, 601 - Maracanã, Rio de Janeiro - RJ, 20550-011 – Brasil – Tel. +55 21 96419-4626 - e-mails: ymsouza@firjan.com.br e valdirmoreiras@poli.ufrj.br

Endereço⁽²⁾: irsilva@peq.coppe.ufrj

Endereço⁽³⁾: Av Athos da Silveira Ramos, 149, Bloco E sala E-203 - Ilha do fundão, Centro de Tecnologia - Escola de Química, Rio de Janeiro CEP - 21941-909. E-mail: claudinei@eq.ufrj.br

Endereço⁽⁴⁾: R. Alzira Brandão 211 Ap 208, CEP 20550-035, Rio de Janeiro/RJ. Email: serra@poli.ufrj.br

Endereço⁽⁵⁾: Rua Geovani de Castro, nº90, Bl: 4, Apt: 411. Jacarepaguá – Freguesia, CEP: 22-763070. Rio de Janeiro/RJ. Email: fcustodio@firjan.com.br

RESUMO

Processos de corte e solda subaquáticos molhados alteram as características físico-químicas da água, pois as emissões de fumos metálicos, que nos processos convencionais são emitidos para a atmosfera, passam a ser transferidos para a coluna de água. Embora esse fato seja observável a olho nu, pois a água em tanques onde são executados esses processos fica visivelmente suja e turva, essa fonte de poluição ainda não foi investigada na literatura científica. Nesse sentido, esse estudo buscou oferecer pela primeira vez uma caracterização físico-química dessa água, obtida depois de aulas práticas de corte e solda subaquáticas executadas no Instituto de Tecnologia de Solda Firjan SENAI. As análises revelaram concentração de ferro 126 vezes e de manganês 46 vezes superior ao permitido pela legislação nacional de referência para descarte de efluentes – CONAMA 430/2011. A carga orgânica da água, medida em termos de DQO, foi de 2267 mg O₂/L, o que evidencia o potencial poluidor dessa água. Também foram feitos experimentos em um tanque na escala de bancada, o que confirmou a tendência de concentrações acima do permitido pela legislação e permitiu ainda obter uma relação

entre a massa de consumíveis de corte e solda usados e a poluição gerada nos tanques. A água gerada ao final do processo não deve ser descartada sem tratamento prévio. Como recomendações deste estudo, têm-se o estudo de tecnologias de tratamento econômica e logisticamente viáveis para efluentes oriundos de ambientes de ensino de corte e soldagem ou demais ambientes onde se realizam essas atividades, como estaleiros.

PALAVRAS-CHAVE: Subaquática, “solda subaquática”, fumos metálicos na água, poluição da água.

INTRODUÇÃO

A soldagem é o mais importante método utilizado industrialmente para a união permanente de metais, tendo utilização na fabricação desde estruturas simples na metalurgia como portões e grades até componentes com elevado grau de complexidade nas indústrias nuclear, química e petrolífera. Atualmente, mais de 10 diferentes processos de soldagem têm utilização industrial, podendo-se citar a soldagem com eletrodo revestido, soldagem a plasma, soldagem com arame tubular, soldagem TIG e soldagem a arco submerso, por exemplo. Além da soldagem, outro processo extensivamente usado é o corte, que é o processo de cortar materiais (geralmente metais ferrosos) com uma ferramenta que combina oxigênio e calor para derreter ou oxidar o material (MARQUES et al., 2014; IAOGP, 2015).

A soldagem e o corte são usados extensivamente em estaleiros na construção e reparo de navios, submarinos e demais estruturas *offshore*. Quando não é possível ou desejável colocar uma estrutura metálica a ser reparada em dique seco (*dry dock*), as operações devem ser realizadas em ambiente aquático (*wet dock*). Além disso, reparos também podem ser feitos no próprio local onde se encontra a estrutura, por exemplo, no ambiente *offshore* por questões logísticas. Nesses casos, utilizam-se os processos de soldagem e corte subaquática. Esses processos se dividem em dois grandes grupos, secos e molhados. O corte e a solda subaquáticos secos são feitos por soldadores dentro de câmaras onde a água é retirada por injeção de ar (câmaras hiperbáricas), a pressão atmosférica. O corte e a solda subaquáticos molhados são feitos por mergulhadores-soldadores totalmente submersos, sem nenhuma barreira mecânica entre a água e o arco de solda (LABANOWSKI et al., 2008).

É importante ressaltar que o desenvolvimento dos processos de soldagem subaquática molhada é recente, tendo se iniciado com experimentos da Marinha Americana durante a Segunda Guerra Mundial e tido crescimento muito limitado até a década de 70. Até então as soldas subaquáticas molhadas tinham qualidade muito baixa e eram pouco usadas, somente em reparos de caráter emergencial em cascos de navio e estruturas portuárias submersas. O drástico aumento no preço do barril de petróleo, ocorrido em 1973 fez com que a extração do petróleo, que se concentrava quase que totalmente em terra, se expandisse rapidamente para a costa marítima. Consequentemente, a necessidade de reparos nessas estruturas no ambiente *offshore* estimulou a realização de muitos trabalhos de pesquisa nessa área, e há um crescente interesse nos processos de corte e solda subaquática, pois eles podem ser usados para reparar ou renovar equipamentos danificados por corrosão, fadiga de material, erro de construção, carga de trabalho excessiva, acidentes e batidas, dentre outros, e já foram feitos em profundidades de até 300m (FULTON, 1986; ROWE & LIU, 2001; LABANOWSKI, 2011).

Ainda hoje em muitos casos as soldas feitas em ambiente subaquático são consideradas temporárias até serem feitos reparos em doca seca, pois possuem qualidade inferior àquelas feitas em condições secas. Isso ocorre, pois, essas soldas possuem grande susceptibilidade a racharem, devido à umidade do ambiente que produz altos níveis de hidrogênio difusível no metal da solda, aliadas a taxas de resfriamento rápido que geralmente produzem microestruturas duras. Quando o metal de solda esfria para a temperatura ambiente, desenvolvem-se tensões residuais, e rachaduras induzidas por hidrogênio podem ocorrer. Além disso, soldas molhadas também são conhecidas por serem muito porosas, o que pode ocorrer devido ao hidrogênio molecular (H₂), monóxido de carbono (CO) ou vapor de água (H₂O), sendo os principais fatores que afetam esse fenômeno a profundidade da água, cobertura do eletrodo e estabilidade do arco (ANAND & KHAJURIA, 2013; LABANOWSKI ET AL, 2008; ROWE & LIU, 2001).

No entanto, é importante ressaltar que a qualidade dessas soldas vem melhorando muito nos últimos anos, e inclusive é possível obter soldas em ambiente molhado que podem ser categorizadas como Classe A de acordo com a AWS D3.6M (LABANOWSKI ET AL, 2008; LABANOWSKI, 2011; FULTON, 1986). Além da questão da qualidade da solda, as outras principais dificuldades associadas à soldagem subaquática podem ser

resumidas como operação em presença de alta pressão devido à coluna de água, possibilidade de produzir ambiente explosivo, e o perigo comum sofrido por mergulhadores, de ter nitrogênio difundido no sangue em proporções perigosas (ANAND & KHAJURIA, 2013).

As vantagens e desvantagens convencionalmente atribuídas aos processos de corte e solda subaquática molhada são, conforme se percebem, discutidas em âmbito econômico, de segurança do trabalho e técnico, na questão de metalurgia. No entanto, o corte e a solda são também atividades poluidoras. Em processos em ambiente seco, essa questão é apresentada na literatura sob a ótica da saúde pública e de saúde ocupacional de soldadores, relacionada à emissão dos fumos de solda (fumos metálicos), conforme demonstram os trabalhos de COLACIOPPO (1984), DIAS & ARAÚJO (2015) e SILVA et al. (2018). No entanto, no ambiente subaquático molhado a questão é diferente, pois não há a emissão de fumos metálicos para a atmosfera diretamente, mas sim sua transmissão para a coluna de água, o que gera poluição nesse meio. Esse aspecto ainda não tem sido discutido na literatura.

Desta forma é de grande relevância o estudo da emissão desses poluentes no ambiente do corte e da solda subaquática. É necessário conhecer e quantificar essa fonte de poluição ambiental para investigar, caso necessário, formas de controlar as emissões ou tratar a água, bem como implementar normas nesse sentido.

OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é apresentar uma abrangente caracterização físico-química da água onde foram executadas operações de corte e solda subaquática molhada. Para isso, estabelecem-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar vários experimentos de corte e solda subaquático em um ambiente controlado (tanque em escala de bancada construído para esse fim).
- Coletar água do tanque de dimensões reais (volume de 8m³) utilizado no Instituto de Tecnologia de Solda Firjan SENAI para aulas e treinamentos de corte e solda subaquática molhada.
- Caracterizar a água poluída recolhida em ambas as situações acima, com abrangente caracterização físico-química.

MATERIAIS E MÉTODOS

O Instituto de Tecnologia de Solda Firjan SENAI oferece cursos de aperfeiçoamento em corte e solda subaquática, e suas instalações e equipamentos foram utilizados nesses estudos. Um mergulhador-soldador habilitado conduziu os experimentos no ambiente subaquático molhado, tanto na escala de bancada quanto na escala real. Este trabalho foi desenvolvido em várias etapas que serão descritas a seguir.

PRIMEIRA ETAPA: MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DOS CONSUMÍVEIS

A fim de orientar a busca de quais metais podem estar presentes na água após os ensaios, foi feita microscopia eletrônica de varredura (MEV) do consumível de corte (broco) e do consumível de solda (eletrodo revestido), identificando os elementos químicos existentes nesses consumíveis. Como o eletrodo revestido tem três componentes (alma, revestimento externo e resina externa), foi feito MEV separadamente na alma e nos revestimentos. O microscópio utilizado foi da marca Bruker®.

SEGUNDA ETAPA: EXPERIMENTOS EM ESCALA DE BANCADA

Foi construído um tanque de aço inox para execução dos experimentos, com as seguintes dimensões (comprimento x largura x altura): 26x12x12cm. Esse tanque foi enchido com água de abastecimento público e dentro dele foram executadas, para cada experimento, uma operação de corte e uma operação de solda subaquática. A solda utilizada foi do tipo eletrodo revestido. Em cada experimento foi consumido totalmente um broco e um eletrodo revestido em uma placa de sacrifício de aço carbono. O broco é do tipo ultratérnico, Broco Prime Cut do fabricante Broco Inc®. O eletrodo revestido é do fabricante OK® para aço de baixo e médio teor de carbono, eletrodo modelo E6013.

O broco o eletrodo revestido foram previamente caracterizados no MEV na primeira etapa, e foram também pesados e medidos antes de cada experimento de forma a associar a massa dos consumíveis com a massa transferida para o meio aquoso ao final do experimento, considerando as concentrações encontradas em mg/L e um volume de 3,744 L do tanque.

Foram realizados 12 experimentos com todas as condições experimentais iguais, de forma a avaliar a variação e consequente confiabilidade e reprodutibilidade dos valores encontrados na caracterização da água poluída. No início de cada experimento, encheu o tanque com água de abastecimento público, e ao final do experimento, a água, visivelmente turva, foi coletada, armazenada adequadamente de acordo com o parâmetro físico-químico a ser analisado e encaminhado para análise. Os experimentos foram feitos a temperatura e pressão ambiente.

TERCEIRA ETAPA: EXPERIMENTOS EM ESCALA REAL

Para execução de aulas práticas, o Instituto de Tecnologia de Solda Firjan SENAI dispõe de um tanque de Estruturas metálicas com volume de 8 m³ onde os alunos-soldadores realizam operações de corte e solda totalmente imersos, sob orientação. O tanque foi preenchido com água de abastecimento público, foi coletada de dentro do tanque antes dos processos de solda/corte (aula) uma amostra da água como branco de campo e após a aula de solda/corte, também foi coletada outra amostra da água. As amostras das águas foram coletadas e armazenadas adequadamente de acordo com o parâmetro físico-químico a ser analisados e então encaminhados para análises.

QUARTA ETAPA: ANÁLISE DA ÁGUA

As águas coletadas foram analisadas para: Demanda Química de Oxigênio (DQO), pH, turbidez e sólidos suspensos totais. A análise de elementos foi solicitada com base nos elementos encontrados pela análise do MEV no broco no eletrodo revestido e na resina de revestimento. As metodologias analíticas utilizadas foram de acordo com os métodos apresentados na Tabela 1:

Tabela 1: métodos utilizados para análise dos parâmetros físico-químicos.

Parâmetro	Método	Incerteza de medição do método
Alumínio total	USEPA 200.7	0,01 mg/L
Cálcio total	USEPA 200.7	0,01 mg/L
DQO	Standard Methods 5220D	4,0 mg/L
Ferro total	USEPA 200.7	0,02 mg/L
Fósforo total	USEPA 200.7	0,003 mg/L
Manganês total	USEPA 200.7	0,06 mg/L
pH	Standard Methods 4500-H+B	0,04
Potássio total	USEPA 200.7	0,04 mg/L
Sólidos Suspensos Totais (SST)	Standard Methods 2540 (D)	0,6 mg/L
Silício	USEPA 200.7	Não disponível
Titânio total	USEPA 200.7	0,002 mg/L
Turbidez	Standard Methods 2130B	0,32 NTU

RESULTADOS OBTIDOS: MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DOS CONSUMÍVEIS

A Figura 1 apresenta o resultado de análise do MEV para consumível de corte subaquática molhada, também chamada broco.

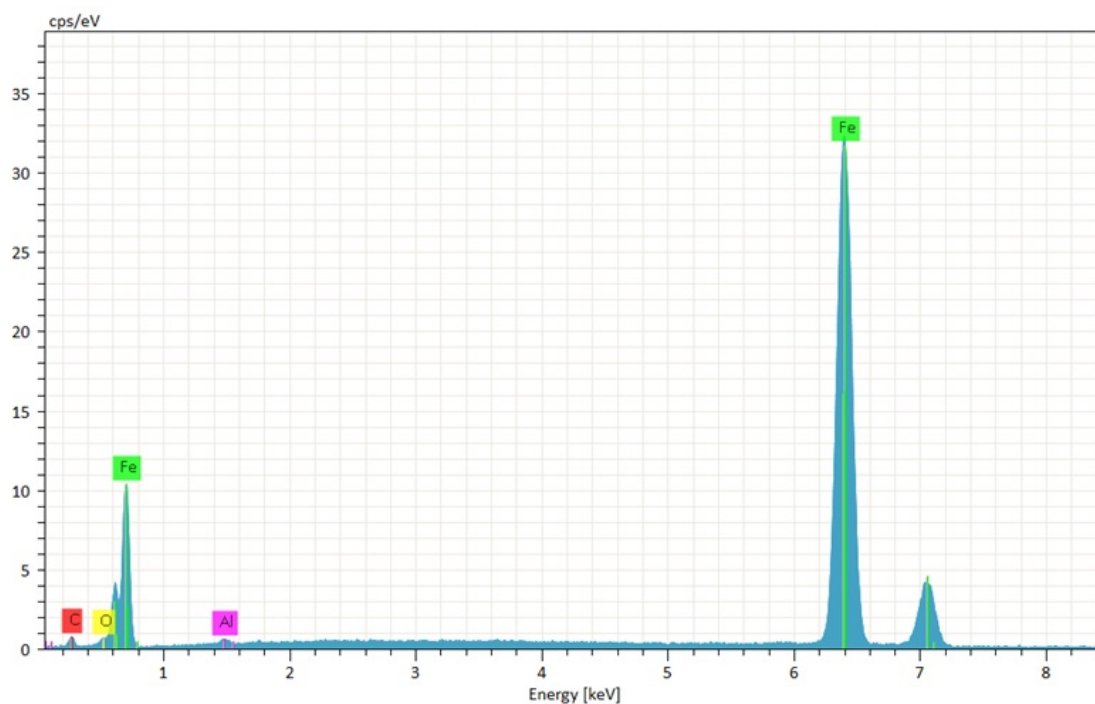


Figura 1: Gráfico de análise do MEV para o broco do corte, com identificação por elemento.

Pela análise da Figura 1, verificou-se que os elementos químicos identificados no broco são carbono, oxigênio, ferro e alumínio.

O consumível da soldagem é chamado eletrodo revestido e ele é composto por três partes: a alma (o consumível propriamente dito), o revestimento externo, que envolve a alma, e um revestimento externo de resina, que envolve o revestimento externo. Todos são consumidos. Dessa forma foram feitos MEV da alma pura (separada dos revestimentos) e MEV do revestimento externo mais a resina. Os resultados são apresentados nas Figuras 2 e 3, respectivamente.

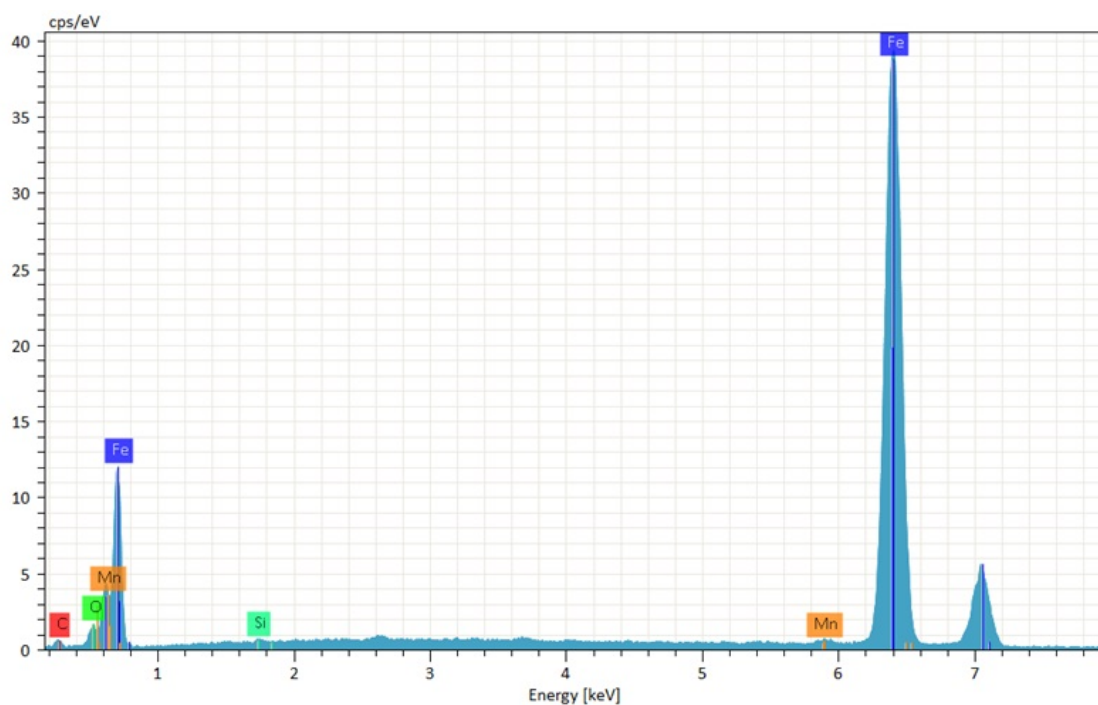


Figura 2: Gráfico de análise do MEV para a alma do eletrodo, com identificação por elemento.

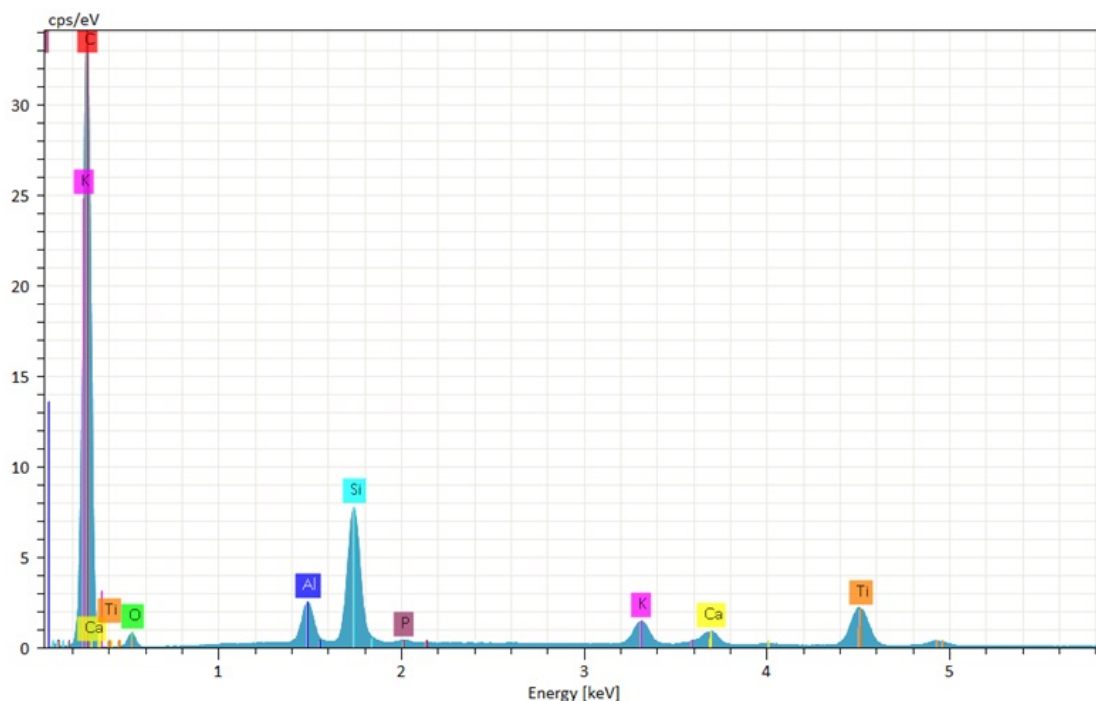


Figura 3: Gráfico de análise do MEV para os revestimentos externo e revestimento com resina do eletrodo, com identificação por elemento.

Pela análise das Figuras 2 e 3, verificou-se que os elementos químicos identificados foram carbono, oxigênio, manganês, ferro, silício, titânio, potássio, alumínio, fósforo e cálcio.

RESULTADOS OBTIDOS: EXPERIMENTOS EM ESCALA DE BANCADA

A Tabela 2 ilustra o resultado da caracterização físico-química de cada um dos 12 experimentos executados. A Tabela 3 apresenta o valor médio encontrado para cada parâmetro, incluindo o branco, e a comparação com a legislação federal de referência para descarte. Considerou-se a água poluída como um efluente a ser descartado, referenciando-se, portanto, pela regulação CONAMA 430 (BRASIL, 2011) para efluente industrial. Foi incluída a legislação de referência nacional e não estadual de forma a tornar o estudo mais abrangente, ao invés de limitar as conclusões ao estado do Rio de Janeiro, onde foi desenvolvido.

Tabela 2: caracterização físico-química dos experimentos 1 ao 12.

Parâmetro	1	2	3	4	5	6
Alumínio total (mg/L)	1,93	0,72	0,64	3,03	2,45	1,80
Cálcio total (mg/L)	13,95	9,83	9,83	70,89	15,26	8,35
DQO (mg/L)	31,00	53,00	21,00	<20	21,00	32,00
Ferro total (mg/L)	20,98	10,18	9,63	17,23	23,56	14,88
Fósforo total (mg/L)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Manganês total (mg/L)	1,811	1,657	0,922	1,053	1,968	1,189
pH	4,90	4,80	5,30	7,20	5,00	5,10
Potássio total (mg/L)	7,96	5,91	6,13	7,50	8,00	6,29
SST (mg/L)	*	*	*	*	*	*
Silício (mg/L)	8,62	8,35	7,57	6,61	8,66	8,76
Titânio total (mg/L)	0,02	<0,01	<0,01	0,03	0,03	0,02
Turbidez (UNT)	132,00	87,00	111,00	127,00	157,00	123,00
Parâmetro	7	8	9	10	11	12
Alumínio total (mg/L)	1,71	1,96	1,31	0,76	1,37	1,49
Cálcio total (mg/L)	9,17	8,39	10,44	12,50	11,66	12,02
DQO (mg/L)	<20	25,00	46,00	76,00	23,00	56,00
Ferro total (mg/L)	19,22	16,18	17,61	1,08	18,17	22,20
Fósforo total (mg/L)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Manganês total (mg/L)	1,688	1,240	0,845	1,617	1,108	1,582
pH	4,90	5,00	5,3	5,00	5,40	5,30
Potássio total (mg/L)	6,97	5,68	4,63	5,72	5,03	5,28
SST (mg/L)	*	*	84,00	170,00	63,00	83,00
Silício (mg/L)	8,47	7,75	7,26	7,26	7,46	8,08
Titânio total (mg/L)	0,03	0,02	0,08	<0,01	0,15	0,21
Turbidez (UNT)	144,00	128,00	117,00	150,00	94,00	118,00

Tabela 3: Média para cada parâmetro, seu desvio-padrão, o limite para descarte pela legislação e os valores para o branco.

Parâmetro	Média dos 12 experimentos	Desvio-padrão do parâmetro	Valor máximo no CONAMA 430/2011	Branco (água abastecimento público)
Alumínio total (mg/L)	1,60	0,68	Não regulado	0,15
Cálcio total (mg/L)	16,02	16,70	Não regulado	57,41
DQO (mg/L)	38,40	17,64	Não regulado	<20
Ferro total (mg/L)	15,91	6,04	15,00	0,26
Fósforo total (mg/L)	<0,1	Não Calculado	Não regulado	<0,1
Manganês total (mg/L)	1,390	0,357	1,000	0,005
pH	5,26	0,64	Entre 5 e 9	7,9
Potássio total (mg/L)	6,26	1,07	Não regulado	4,2
SST (mg/L)	100,00	41,27	Não regulado	<5,0
Silício (mg/L)	7,90	0,66	Não regulado	<5,0
Titânio total (mg/L)	0,07	0,07	Não regulado	<0,01
Turbidez (UNT)	124,00	19,95	Não regulado	0,5

Para fins de ilustração, a Figura 4 abaixo mostra fotos do tanque de bancada cheio de água, no início e no final de um experimento.

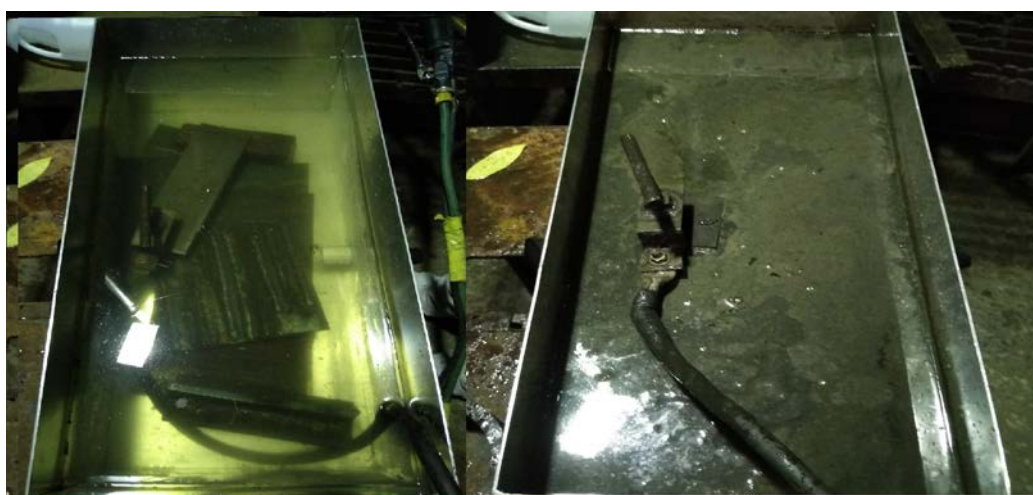


Figura 4: tanque de bancada com água de abastecimento público no início (esquerdo) e final (direita) do experimento

A Tabela 4 apresentam os resultados das massa e as dimensões dos brocos (corte) e eletrodos revestidos (solda) usados em cada experimento.

Tabela 4: massa e dimensão dos brocos e eletrodos revestidos utilizados.

Consumível	Massa	Comprimento	Diâmetro
Broco do experimento 1	126,20 g	379,50 mm	9,80 mm
Broco do experimento 2	127,80 g	379,50 mm	9,70 mm
Broco do experimento 3	127,60 g	382,00 mm	9,94 mm
Broco do experimento 4	128,00 g	379,50 mm	10,00 mm
Broco do experimento 5	126,40 g	381,00 mm	9,82 mm
Broco do experimento 6	125,50 g	381,00 mm	9,72 mm
Broco do experimento 7	129,70 g	388,00 mm	9,94 mm
Broco do experimento 8	125,00 g	382,00 mm	9,78 mm
Broco do experimento 9	127,70 g	389,00 mm	10,00 mm
Broco do experimento 10	128,90 g	391,00 mm	9,88 mm
Broco do experimento 11	129,80 g	391,00 mm	9,90 mm
Broco do experimento 12	127,90 g	380,50 mm	9,84 mm
Eletrodo revestido do experimento 1	19,60 g	334,00 mm	4,72 mm
Eletrodo revestido do experimento 2	20,10 g	349,00 mm	4,40 mm
Eletrodo revestido do experimento 3	19,20 g	350,00 mm	4,00 mm
Eletrodo revestido do experimento 4	20,60 g	349,00 mm	4,66 mm
Eletrodo revestido do experimento 5	19,70 g	349,00 mm	4,32 mm
Eletrodo revestido do experimento 6	19,60 g	349,50 mm	4,32 mm
Eletrodo revestido do experimento 7	19,70 g	349,00 mm	4,16 mm
Eletrodo revestido do experimento 8	19,80 g	334,50 mm	4,36 mm
Eletrodo revestido do experimento 9	19,20 g	334,50 mm	4,04 mm
Eletrodo revestido do experimento 10	19,40 g	349,00 mm	4,12 mm
Eletrodo revestido do experimento 11	19,60 g	349,00 mm	4,18 mm
Eletrodo revestido do experimento 12	19,70 g	349,00 mm	4,16 mm

A Tabela 4, a massa média do broco é $127,46 \pm 1,36$ g e a massa média do eletrodo revestido é $19,68 \pm 0,35$ g.

RESULTADOS OBTIDOS: EXPERIMENTOS EM ESCALA REAL

A Tabela 5 apresenta o resultado da caracterização físico-química da análise e o respectivo limite de descarte na CONAMA 430/2011.

Tabela 5: caracterização físico-química dos experimentos em escala real e o limite para descarte pela legislação.

Parâmetro	Valor	Valor máximo no CONAMA 430/2011
Alumínio total (mg/L)	1,62	Não regulado
Cálcio total (mg/L)	78,38	Não regulado
DQO (mg/L)	2267,00	Não regulado
Ferro total (mg/L)	1899,34	15,00
Fósforo total (mg/L)	<0,1	Não regulado
Manganês total (mg/L)	46,862	1,000
pH	5,00	Entre 5 e 9
Potássio total (mg/L)	6,17	Não regulado
SST (mg/L)	280,00	Não regulado
Silício (mg/L)	19,77	Não regulado
Titânio total (mg/L)	0,13	Não regulado
Turbidez (UNT)	184,00	Não regulado

Para fins de ilustração, a Figura 5, mostra fotos do processo.



Figura 5: da esquerda para a direita, o mergulhador-soldador dentro do tanque no decorrer do experimento; vista de cima do tanque durante a execução do experimento; vista de dentro do tanque durante uma soldagem subaquática molhada, onde é possível visualizar as partículas de poluição na coluna da água como uma massa escura acima do mergulhador.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

No decorrer das aulas, a água do tanque se torna tão suja devido aos processos de corte e solda, que os mergulhadores-soldadores perdem quase toda a visibilidade, e a água deve ser trocada periodicamente. Devido a natureza das aulas não é sempre possível saber com exatidão a quantidade de brocos e eletrodos revestidos consumidos antes de cada troca, o que prejudica uma análise quantitativa relacionando a massa de consumíveis usada com a poluição gerada em um dado volume, no caso o tanque de 8 m³. Dessa forma, observou-se a necessidade de realizar experimentos em condições controladas e dessa forma reproduzíveis, em escala de bancada, onde foi possível quantificar a massa de consumíveis que entrou no tanque e gerou a poluição apresentada.

Foram medidos, em média, 127,46g de broco e 19,68 g de eletrodo revestido geram a poluição caracterizada na Tabela 3. Para resultados menos genéricos do que a média, há os valores obtidos para cada parâmetro, por experimento, na Tabela 2, e as massas de consumíveis gastos por experimento na Tabela 4. Em termos mássicos, deve-se considerar que o tanque de bancada tem 3,744L, e, portanto, multiplicar a concentração na Tabela 2 (que está em mg/L) por 3,744 para obter a massa total no tanque após um experimento. Essa massa originou-se a partir do total de consumíveis (massa do broco + massa do eletrodo) referente a esse experimento, massas essas que estão listadas na Tabela 4. Assim tem-se, por exemplo, que no experimento 1, 78,55 mg de ferro dissolvidos foram originados a partir da queima de 145,80g de consumíveis, o que significa dizer que 0,05% da massa total de consumível foi transferida para a água na forma de ferro dissolvido.

Pelos experimentos em escala de bancada, observou-se ainda que 100% dos metais encontrados no MEV (presentes nos consumíveis) foram encontrados também na água, o que evidencia a transferência dos metais do meio sólido para o líquido durante os processos subaquáticos molhados. No processo de corte, pequenos fragmentos do metal cortado são visíveis a olho nu, pois são pesados e acumulam no fundo do tanque (isso ocorre tanto no tanque de bancada quanto no tanque real). Porém pode-se concluir que o ato do corte do metal gerou também transferência de minúsculas partículas para o seio da água, o que contribui para os resultados das Tabelas 2 e 5. No caso da soldagem, pode-se concluir que nem todo o consumível se torna parte integrante da composição da solda, havendo “perda” de uma parcela para o meio (água).

Com base na comparação entre os parâmetros físico-químicos e a referência da legislação, encontrados nas Tabelas 3 e 5, é possível comprovar a poluição da água pelos processos de corte e solda subaquáticas, pois as concentrações de ferro e manganês foram encontradas em desacordo com a CONAMA 430/2011. No caso do tanque real, as não conformidades se ressaltam ainda mais, visto que a concentração encontrada de ferro foi 126 vezes superior ao permitido pela legislação, enquanto a de manganês foi 46 vezes superior.

Como foi usada a legislação de referência de abrangência nacional, essas conclusões valem para qualquer estado brasileiro, porém, é possível que legislações locais com limites ainda menores de descarte, ou que regulem mais parâmetros, tornem a água poluída ainda mais distante do padrão adequado de lançamento. Várias legislações estaduais regulam, por exemplo, a DQO, cujo valor elevado de 2267 mgO₂/L encontrado no tanque real provavelmente seria enquadrado acima do limite permitido. Para fins de comparação, a DQO de esgotos sanitários sem tratamento, que são regulados, fica entre 500-900 mgO₂/L, o que evidencia o potencial poluidor de um efluente com matéria orgânica até três vezes mais concentrada.

É importante ressaltar que foi estudada somente uma fonte de emissões de poluentes por corte e solda subaquática molhada. Outras fontes muito maiores em magnitude incluem lançamentos oriundos de construção e reparos de estruturas em diques molhados de estaleiros, ou o ambiente offshore propriamente dito, durante a manutenção de plataformas e navios. Emissões oriundas de centros de treinamento ou de diques molhados são relativamente mais simples de serem controlados/tratados, pois tratam-se de fontes pontuais. Emissões geradas no ambiente offshore são difusas e, portanto, muito mais difíceis de serem controladas. Uma estratégia seria bombear a água subjacente ao mergulhador-soldador à superfície para tratamento.

No caso de ambientes de ensino como o SENAI, a água proveniente dos tanques seria lançada em rede coletora de esgotos, e não diretamente no corpo hídrico, configurando, portanto, um lançamento indireto. Para esses casos a regulação federal CONAMA 430 esclarece no seu artigo 1º, parágrafo único que o lançamento deve obedecer diretrizes ou normas específicas do órgão ambiental competente, quando existam, e na ausência destes, obedecer aos limites de lançamento direto da própria CONAMA 430.

Considerando os limites estaduais do estado do Rio de Janeiro, onde foi executado o presente estudo, a norma de referência para descarte de efluentes é a Norma Técnica (NT) 202 do Instituto Estadual do Ambiente (INEA), que não faz diferenciação para lançamentos na rede coletora ou em corpos hídricos. Isso é diferente de normas estaduais de outros estados, como por exemplo, São Paulo (Decreto 8468/76) e Ceará (COEMA, 2017), onde explicitamente se dá padrões de lançamento distintos quando se lança na rede coletora de esgotos. Portanto, futuros estudos deverão considerar esse fator adicional. No entanto, para outras fontes de emissões de poluentes por corte e solda subaquática molhada, por exemplo, diques molhados de estaleiros, espera-se que os lançamentos sejam diretos no corpo hídrico receptor.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A atividade de corte e solda subaquáticas molhadas gera poluição na água, o que ficou evidente pelos resultados apresentados neste trabalho. Após aulas práticas com mergulhadores-soldadores dentro do tanque, a água desse tanque foi analisada e revelou concentração de ferro 126 vezes superior ao permitido pela legislação nacional de referência para descarte de efluentes – CONAMA 430/2011. A concentração de manganês foi 46 vezes superior ao limite dessa referência. A carga orgânica da água, medida em termos de DQO, foi de 2267 mgO₂/L, o que é um valor elevadíssimo, evidenciando o potencial poluidor dessa água se lançada sem tratamento prévio em corpo hídrico.

Experimentos em condições mais fáceis de serem controladas e reproduzidas foram feitos em um tanque na escala de bancada, o que confirmou a tendência de ferro e manganês acima do permitido pela legislação. Isso aconteceu também com o pH em alguns experimentos, onde o pH final ficou abaixo do mínimo permitido de 5,0. Esses efeitos foram observáveis consumindo apenas um eletrodo de corte e um de solda por experimento. Nesses experimentos em bancada, foram pesados os consumíveis antes do uso, e por isso foi possível quantificar a massa de consumíveis que entrou no tanque e que gerou a poluição observada. Deve-se ressaltar que alguns elementos encontrados na água, como o silício e o titânio, não possuem valores de referência na legislação.

A água gerada ao final do processo não deve ser descartada sem tratamento prévio nem na rede coletora de esgotos, pois viola parâmetros do padrão de lançamento. Atualmente no SENAI ela é separada e encaminhada para empresa terceirizada de tratamento, o que está gerando custos à instituição, e por isso há interesse em desenvolver sistema de tratamento para a água no local. Como recomendações deste estudo, têm-se o estudo de tecnologias de tratamento econômica e logisticamente viáveis para efluentes oriundos de ambientes de ensino de corte e soldagem ou de estaleiros, que são fontes pontuais de emissões e que, portanto, são relativamente mais simples de serem controladas/tratadas, pois é possível separar a água poluída. A questão de como controlar essa poluição em ambientes *offshore* é uma questão que ainda tem que ser muito discutida, pois apresenta muito mais dificuldade por não haver uma fonte fixa de geração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BRASIL. Resolução CONAMA nº 430 de 13 de maio 2011, Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. Publicação DOU nº 92, de 16/05/2011, pág. 89
2. ANAND A., KHAJURIA A., *Welding Processes in Marine applications: a review*, Int. J. Mech. Eng. & Rob. Res. 2013, Vol. 2, No. 1, Ano 2013
3. CEARÁ. Regulação COEMA nº 2 de 2 de fevereiro de 2017. Dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras. Publicação no DOE - CE em 21/02/2017
4. COLACIOPPO, S., Avaliação da exposição profissional a fumos metálicos em operações de solda. São Paulo, 1984. Tese de doutorado (Doutorado em Saúde Pública) - Faculdade de Saúde Pública, Universidade Federal de São Paulo, 1984.
5. DIAS, T.M.A., ARAÚJO, G.F., *Percepção dos trabalhadores de soldagem em relação a exposição aos riscos de acidente no local de trabalho*, Revista Enfermagem Contemporânea, v.4 n.1. Ano 2015 doi 10.17267/2317-3378rec.v4i1.472
6. FULTON, R.N., *Advances in underwater welding*, 1986, Conference Oceans '86, Washington, DC, USA, Ano 1986 doi 10.1109/OCEANS.1986.1160557
7. International Association of Oil & Gas Producers (IAGOP), *Oxy-arc underwater cutting recommended practice*. Report 471, Março 2015, disponível em < https://www.offshore-europe.co.uk/_novadocuments/99578?v=635756647338970000>, acesso em 27 de março de 2019.
8. LABANOWSKI, J., *Development of under-water welding techniques*, Welding International, 25:12, 933-937. Ano 2011.
9. LABANOWSKI, J., FYDRYCH, D., ROGALSKI, G., *Underwater welding a review*. Advances in Materials Sciences 8(3):11-22. Ano 2008. doi: 10.2478/v10077-008-0040-3.
10. MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A.Q. *Soldagem: fundamentos e tecnologia*. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2011.
11. ROWE M., LIU S., *Recent developments in underwater wet welding*, Science and Technology of Welding and Joining, 6:6, 387-396. Ano 2001. DOI: 10.1179/stw.2001.6.6.387

12. SÃO PAULO, Decreto nº 8.468, de 08/09/1976, Aprova Regulamento que disciplina a execução da Lei n. 997, de 31/05/1976, que dispõe sobre controle da poluição do meio ambiente, DOE-SP em 09/09/1976, p.4
13. SILVA J.P., MÉNDEZ G;L., MARRUGO G., MONROY H;M;., HERRERA L.B., *Determinación de metales pesados en humos metálicos presentes en ambientes informales de trabajo dedicados a la soldadura*, Rev. Colomb. Cienc. Quím. Farm., Vol. 47(1), 14-25, ano 2018, doi 10.15446/rcciquifa.v47n1.70653