

# Inovações no Processo de Revestimento por Plasma-pó (PTA-P) para Aplicação na Recuperação de Pás de Turbinas Hidráulicas

Régis H. G. e Silva, Jair C. Dutra e Fernando A. C. Ribas

**Resumo** – Em vários setores industriais estão presentes mecanismos de desgaste da superfície das peças. Um exemplo onde se observa grande impacto desse fator é a área de geração de energia, que se caracteriza por produção intermitente em larga escala. No caso das usinas hidrelétricas, um dos problemas a serem vencidos é a erosão das pás das turbinas geradoras por cavitação. O controle deste desgaste deve ser periodicamente realizado, no contexto de paradas para manutenção das máquinas. Uma opção tecnológica para este procedimento é a soldagem PTA-P (Plasma com adição de pó metálico), concebida para revestimentos. No entanto, nenhum sistema havia sido ainda dedicado a este procedimento específico, dotado de peculiaridades que exigem maior customização. Desta forma, se geraram inovações tecnológicas em componentes do sistema e em seu software de controle, as quais foram implementadas em um sistema integrado dedicado ao PTA-P, que permitirá aplicações em campo, no combate à cavitação.

**Palavras-chave** – alimentador de pó, tocha PTA, fonte de soldagem compacta, soldagem sobre-cabeça, revestimento superficial

## I. INTRODUÇÃO

Uma das medidas de desenvolvimento de um país é o acesso da população à energia, impulsionador determinante para o desenvolvimento econômico. Assim, investimentos no setor, que resultem em maior qualidade e eficiência de produção têm elevada importância, lembrando que 70 % da energia elétrica produzida no Brasil são de origem hidráulica [1, 2]. Anos atrás, o LABSOLDA, em parceria com uma empresa estatal (hoje Tractebel Energia, maior empresa privada de geração de energia elétrica do Brasil, com 8% do total nacional [2]), desenvolveu o processo e procedimentos de soldagem MIG/MAG Pulsado com Pulsação Térmica® [3], dedicado à recuperação de erosão por cavitação em pás

de turbinas de geradores hidráulicos, o qual foi adotado como padrão para essa operação. Este trabalho recebeu menção honrosa em premiação internacional da UNESCO [4].

Melhorias nos processos de manutenção dessa empresa, inclusive na recuperação das áreas cavitadas, podem surtir impacto considerável na disponibilidade de máquina e, conseqüentemente, no resultado financeiro, já que 80 % da sua geração vêm de suas usinas hidrelétricas.

A cavitação, mecanismo de desgaste causado por impactos de alta frequência decorrentes de implosão de microbolhas originadas por um perfil de pressão característico, gera cavidades na superfície, as quais implicam em alteração da geometria da pá e perda de eficiência. O fenômeno é intrínseco às condições de fluxo impostas pela geometria da pá. Ou seja, como não há material idealmente imune à cavitação, e como a troca das peças é inviável, a atitude a ser tomada consiste no controle periódico do desgaste, pelo reparo das áreas erodidas. Isto é realizado por deposição por soldagem e, no sentido de se melhorar a qualidade do reparo, são utilizadas ligas especialmente desenvolvidas, com alta resistência à cavitação.

Em relação ao processo de soldagem utilizado, são previstas potenciais melhorias com o uso do PTA-P, apesar do atual bom desempenho do MIG/MAG com Pulsação Térmica. As vantagens atribuídas ao processo PTA-P que o destacam entre os processos de revestimento metálico por soldagem se relacionam ao fato de ser um processo a eletrodo permanente, o que permite a regulação independente entre a energia fornecida e a adição de material [5]. Torna-se possível, assim, executar um controle do calor aportado ao material de adição, de acordo com as necessidades e dentro de determinada faixa de operação. Quando, por exemplo, se busca menor penetração / diluição e maior espessura de camada, é possível introduzir maior quantidade de material, que consumirá maior proporção da energia total, em detrimento da energia imposta à peça. No caso específico do PTA-P há ainda a possibilidade de se atuar nas quantidades de calor à peça e ao material de adição por intermédio do arco piloto [6]. A menor diluição resulta em maior pureza do metal nobre adicionado em relação à contaminação proveniente do metal de base, o que, conseqüentemente, reduz a exigência quanto ao número mínimo de camadas sobrepostas necessárias para que a superfície apresente as propriedades resistentes do metal adicionado.

Um dos fatores mais expressivos quando da tomada de decisão pelo PTA-P reside na natureza do material de adi-

---

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

Este trabalho foi realizado com o apoio da TRACTEBEL Energia.

R. H. G. e Silva e J. C. Dutra trabalham no Laboratório de Soldagem (LABSOLDA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). (e-mails: regis@labsolda.ufsc.br, jdutra@labsolda.ufsc.br).

F. A. C. Ribas trabalha na TRACTEBEL Energia - (e-mail: fribas@tractebelenergia.com.br).

ção, em forma de pó, cuja composição química pode ser manipulada flexível e agilmente conforme demandas de aplicações, além de permitir formulação de ligas com materiais duros, de inviável trefilação em arames maciços [7].

A rigidez do arco principal, proporcionada pela presença do gás de plasma e do arco piloto, colabora para a obtenção de melhor controlabilidade da poça metálica e melhor acabamento superficial dos cordões depositados [8].

Portanto, surge a possibilidade de redução de tempos secundários de retrabalho, tanto para adequação da superfície para deposição de camadas sucessivas, como para recuperação do perfil original da peça ou obtenção da qualidade superficial necessária à determinada operação.

As propriedades vantajosas creditadas ao PTA-P formam uma rede onde umas influem nas outras, culminando em benefícios produtivos com potencial para impactos sensíveis na redução de custos, a partir de menos retrabalho, menos desperdício, menor tempo total de manutenção e menor quantidade de material nobre (de alto preço).

Os benefícios estão condicionados, no entanto, à viabilidade técnica de aplicação em determinada operação. São descritas na literatura técnica e científica quase exclusivamente aplicações na posição plana de soldagem, realizadas em oficinas ou laboratórios e de maneira mecanizada. Os desafios estabelecidos pela aplicação na recuperação de pás de turbinas hidrelétricas residem, portanto, na solução para soldagem em posições forçadas, na geração de um sistema passível de ser adequadamente movimentado dentro dos ambientes com espaço e mobilidade limitados das salas de máquinas, e no design de uma tocha de soldagem manual compacta.

Com estas justificativas e desafios em mente, se objetiva: o projeto e construção de um alimentador de pó que seja capaz de, mesmo atuando na direção contrária a aceleração da gravidade, proporcione alimentação contínua e regular de pó ao arco de soldagem, ainda que o pó não apresente características ideais; o projeto e construção de um sistema de soldagem compacto, integrado e projeto e construção de uma tocha manual com um circuito de refrigeração de alta eficiência, que permita compactação, facilidade de troca de bico constritor e utilização de apenas uma unidade de refrigeração. A possibilidade de regulação de energia de soldagem e taxa de alimentação de material por intermédio de botões na própria tocha também é desejada.

O título do projeto do qual surgiu o presente trabalho é: Desenvolvimento de Ligas Específicas e Tecnologias em Soldagem a Plasma com Pó Metálico para Aplicação em Regiões de Turbinas Hidráulicas Sujeitas à Erosão por Cavitação, com código PD-0403-008/2007, ainda em execução no LABSOLDA – Laboratório de Soldagem da Universidade Federal de Santa Catarina, tendo suporte financeiro da Tractebel Energia.

## II. ALIMENTADOR DE PÓ - ADP

Decidiu-se por iniciar investigações sobre o conceito de alimentadores do tipo válvula rotativa, devido à sua simplicidade construtiva e larga aplicação no mercado. Foi adquirido, então, um equipamento importado com este princípio

de funcionamento e seu desempenho foi analisado quanto à repetitividade e capacidade de alimentar diferentes tipos de pós. Nem sempre os pós metálicos estão disponíveis em uma versão otimizada para o PTA-P, ou seja, esféricos e com uma granulometria adequada. Um exemplo é a etapa inicial de desenvolvimento de ligas metálicas [9]. Em alguns casos, são primeiramente utilizados pós obtidos por trituração e mistura mecânica, processos mais baratos e rápidos que a atomização da liga.

O ADP comercial PM-PF-10 (Figura 1), apresentou desempenho considerado apropriado (comportamento linear e baixo desvio padrão).



Figura 1. ADP Comercial

A Tabela 1 descreve a bateria de ensaios realizados com pó 316 L atomizado em água (fabricação nacional, Figura 2) e a Figura 3 ilustra os resultados.

Tabela 1. Vazão mássica de pó, ADP PM-PF-10, liga 316L atomizada em água

Regulagem (RPM)	Medição1 (g/min)	Medição2 (g/min)	Medição3 (g/min)	média (g/min)	desvio padrão (g/min)	kg/h
1 (0,9)	3,55	2,80	2,8	3,05	0,43	0,18
2 (2,4)	6,65	6,45	6,3	6,47	0,17	0,39
3 (3,8)	11,00	10,00	9,9	10,30	0,61	0,62
4 (5,3)	14,50	14,05	13,8	14,12	0,35	0,85
5 (6,8)	17,45	16,75	16,7	16,97	0,42	1,02
6 (8,2)	20,10	19,75	20,5	20,12	0,37	1,21
7 (9,7)	22,40	22,30	23,2	22,63	0,49	1,36
8 (11,1)	25,15	24,95	25,95	25,35	0,53	1,52
9 (12,6)	28,00	27,70	28,85	28,18	0,59	1,69
10 (14,1)	30,70	30,80	32,05	31,18	0,75	1,87

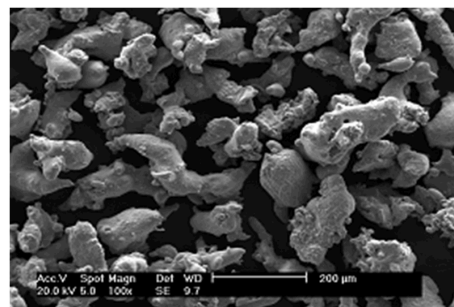


Figura 2. Pó metálico 316L atomizado em água

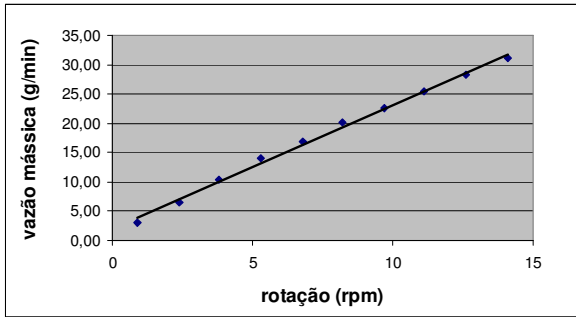


Figura 3. Vazão mássica de pó, ADP PM-PF-10, liga 316L atomizada em água (com linha de tendência)

Para a liga LO3\* (mistura de pós triturados), apesar de sua morfologia irregular (Figura 4) seu comportamento se mostrou relativamente satisfatório. Apesar disso, foram observadas partículas assemelhadas à limalha aderidas ao tubo dosador do equipamento (Figura 5). Isto também ocorreu com a versão atomizada deste material e a hipótese foi a magnetização do material (a causa não foi investigada profundamente).

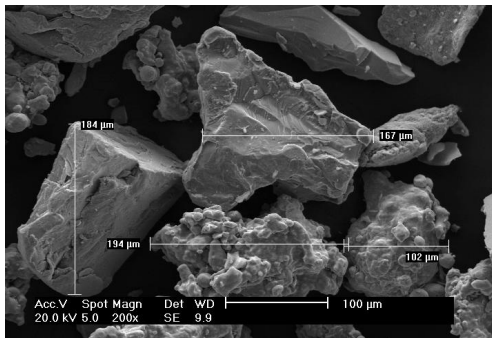


Figura 4. Morfologia da liga LO3\* (mistura de pós triturados)



Figura 5. Partículas aderidas ao canal de queda do ADP

Já a tentativa de se alimentar o pó 316L de menor granulometria (11 µm - 45 µm) falhou devido ao não escoamento do pó através do canal de queda do ADP. O tamanho dos grãos causa propensão à compactação das partículas. Isso foi considerado um limitante do sistema (principalmente quando aplicado em pesquisa e desenvolvimento).

Outro limitante desse equipamento reside no fato de que, assim como no primeiro ADP estudado (fuso transportador), o silo armazenador de pó opera pressurizado, o que dificulta o retorno de pó para o mesmo. Esse retorno de pó se mostra necessário quando se considera a implementação da pulsação do material de adição, uma das inovações a serem estudadas no futuro. A literatura não informa a finalidade da pressurização do silo. Sendo assim, se realizou um ensaio cuja finalidade foi investigar a diferença na alimentação para silo aberto e fechado.

De fato, conforme mostra a Figura 6, o silo aberto resultou em menor capacidade do gás de arraste em transportar o pó (menor distância alcançada pelas partículas) para a mesma vazão de gás regulada.

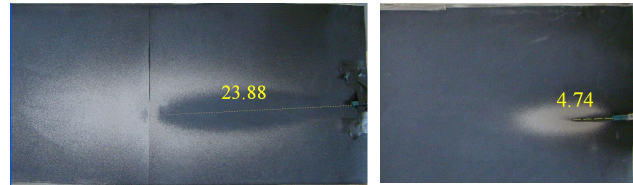


Figura 6. Distância (em mm) alcançada pelo jato de partículas com silo do alimentador modelo PM-PF-10 fechado (à esquerda.) e aberto (à direita), sob a mesma regulagem de vazão de gás (5 l/min, Ar)

Em assim sendo, se imaginou uma configuração na qual se obtivesse um isolamento físico entre o reservatório de pó (permitindo que este opere sem pressurização) e o recipiente que recebe o pó após sua dosagem. Esta foi mantida por válvula rotativa. Um desenho esquemático do chamado ADP-2 se encontra na Figura 7.

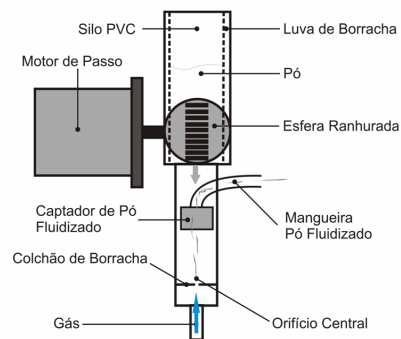


Figura 7. Esquema do ADP-2 com silo aberto

Neste ponto surgiu uma dúvida quanto à possibilidade de contaminação do gás de arraste por ar atmosférico que por ventura viesse a transpor a vedação da válvula rotativa. Desse modo, foram realizados ensaios de soldagem com o silo aberto e fechado pressurizado com Ar (montagem vista na Figura 8), aos quais se seguiu análise da composição química do depósito soldado para verificação de possível oxidação.

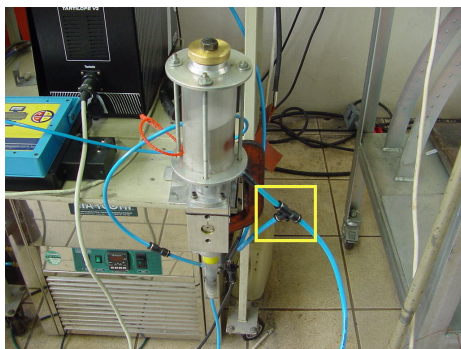


Figura 8. Montagem do sistema para pressurização do silo armazenador do ADP-2 (detalhe do “T”, que divide o gás entre a pressurização do silo e o arraste do pó)

Não houve diferença significativa nos teores de oxigênio do metal de solda, como mostra a Figura 9 (uma quantificação de oxidação pela medição da quantidade de oxigênio também foi realizada em [10]). Além disso, o cordão com silo fechado apresentou irregularidade geométrica. Isto pode ter sido causado por flutuações na pressão interna do fluidizador. (Ensaio preliminares com menor quantidade de pó no silo resultaram pulsação intensa no fluxo de gás / pó na tocha, possivelmente causada por desbalanceamentos intermitentes entre a pressão do silo e a pressão do fluidizador.)



Silo aberto		Teor médio de O 1,62 %
Silo fechado		Teor médio de O 1,55 %

Figura 9. Verificação da geometria do cordão (vista superior) e do teor médio de oxigênio na seção transversal

Apesar desta verificação, se considerou apropriado, por motivos de segurança, principalmente em campo, manter apenas uma pequena abertura na tampa do silo (Figura 10), que também permite o funcionamento do retorno de pó.

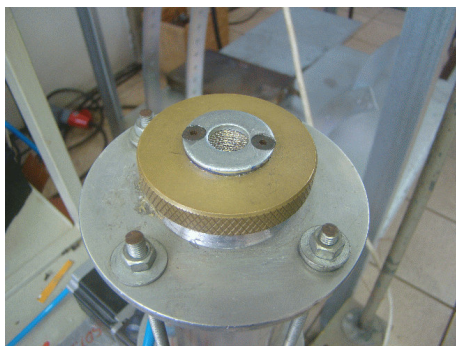


Figura 10. Silo armazenador com pequena abertura na tampa e tela protetora

Já a impossibilidade de alimentação de pós de menor granulometria (e/ou magnetizado) foi sobrepujada pelo novo design do acoplamento entre silo e tambor da válvula rotativa. Projetou-se um tambor de maior largura, permitindo também um maior diâmetro da ligação (canal de queda) entre as duas partes do ADP-2, o que eliminou a compactação do material e o entupimento ora citado. A Figura 11 mostra o projeto do ADP-2 em CAD, suas principais partes constituintes e o sistema montado.

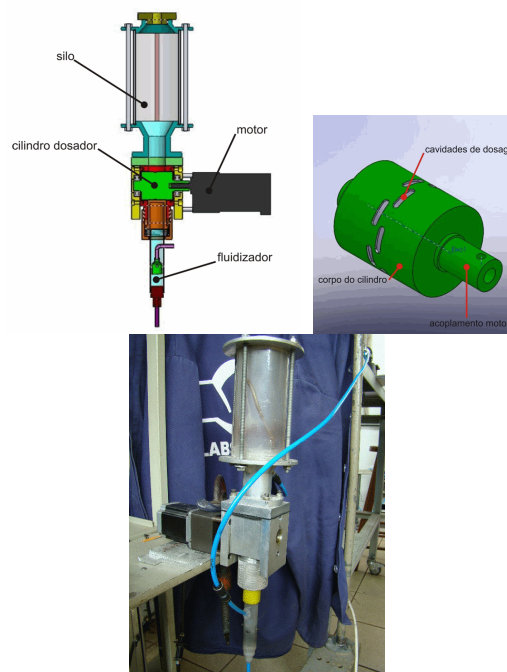


Figura 11. Modelo em CAD do ADP-2, cilindro dosador e ADP-2 montado

O novo tambor, devido às suas cavidades alongadas longitudinalmente ao sentido de rotação (detalhe Figura 11), permite que o comprimento destas se sobreponha, mantendo a continuidade da alimentação. Além disso, essa mesma característica construtiva permite que se fabriquem ranhuras paralelas, possibilitando a regulação de diferentes faixas de alimentação de pó, para mesmas rotações. O tambor com ranhuras transversais à rotação, como o comercial PM-PF-10, não permite tal flexibilidade. A existência de superfícies em atrito do ADP-2 exige uma seleção de materiais resistentes à abrasão, o que está sendo feito, e acarretaria também em um tempo menor de vida útil de determinadas partes. Este aspecto, no entanto, será mais investigado a posteriori, para condições industriais de utilização.

Testes de desempenho mostraram baixa sensibilidade da alimentação à quantidade de pó no silo, o que foi um problema para o dosador tipo fuso [11]. A dosagem volumétrica é realizada pela rotação do tambor, que tem suas cavidades preenchidas quando passam pela parte inferior do silo armazenador e esvaziadas na região diametralmente oposta, entregando o pó à linha de arraste. A Tabela 2 mostra os resultados dos testes.

Tabela 2. Desempenho do ADP-2 (IHM – interface homem / máquina)

Massa inicial de pó no silo: 202,0 g						
Regulação na IHM (rpm)	Medição1 (g/min)	Medição2 (g/min)	Medição3 (g/min)	Média (g/min)	Desvio padrão (g/min)	desvio padrão em % da média
15 (11,25)	13,60	13,50	13,60	13,5	0,06	0,42
25 (18,75)	21,90	21,70	21,80	21,8	0,10	0,46
Massa inicial de pó no silo: 610,0 g (aproximadamente meio volume total)						
Regulação na IHM (rpm)	Medição1 (g/min)	Medição2 (g/min)	Medição3 (g/min)	Média (g/min)	Desvio padrão (g/min)	desvio padrão em % da média
15 (11,25)	13,40	13,15	13,25	13,2	0,12	0,95
25 (18,75)	21,45	21,55	21,30	21,4	0,12	0,59

Nota-se que dentro dessa faixa, apesar de uma tendência a alimentação mais alta para menores quantidades de pó no silo, a diferença não passa de 2,6 % (para 11,25 rpm) entre as vazões mássicas de pó. Outro fator positivo se vê no baixo desvio padrão das medições, indicando repetitividade.

A Tabela 3 e a Figura 12 demonstram um funcionamento linear do sistema. O material utilizado neste ensaio foi o pó de aço inox 316 L esférico (53 µm – 180 µm), diferente do anterior (da Tabela 2), de 50 µm – 90 µm (origem da diferença nos valores de vazão mássica).

Tabela 3. Determinação da curva de alimentação do ADP-2

Regulação na IHM (rpm)	5 (3,75)	10 (7,5)	15 (11,25)	20 (15,0)	25 (18,75)
vazão1 (g/min)	7,2	13,9	20,7	26,1	32,5
vazão2 (g/min)	7,0	13,7	20,4	26,4	32,5
vazão3 (g/min)	7,0	14,1	20,6	25,8	32,4
média (g/min)	7,07	13,90	20,57	26,10	32,4
desvio padrão (g/min)	0,12	0,20	0,15	0,30	0,06
desvio padrão em % da média	1,63	1,44	0,74	1,15	0,18

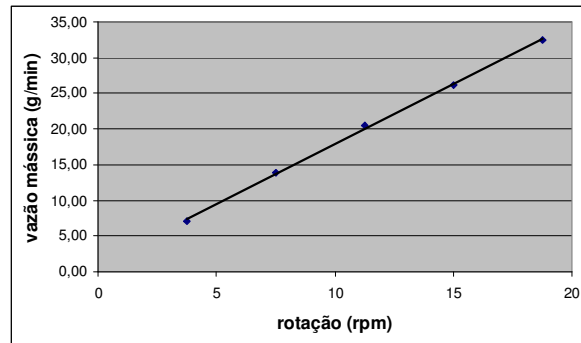


Figura 12. Vazão mássica de pó, ADP-2, liga 316L em pó esférico (com linha de tendência)

Para visualização rápida, o gráfico em rede da Figura 13 fornecem um panorama da análise comparativa qualitativa entre os modelos de alimentador de pó considerados, a partir do qual se selecionou para continuação do trabalho o ADP-2.

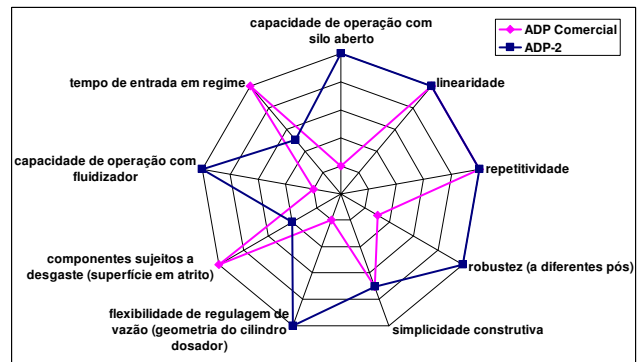


Figura 13. Gráfico em rede comparativo entre os ADPs investigados

### III. SISTEMA DE SOLDAGEM COMPACTO INTEGRADO

A aplicabilidade prática dos resultados de suas atividades de Pesquisa e Desenvolvimento tem sido objetivo crucial do LABSOLDA. Por isso, condições de campo, que diferem substancialmente das de laboratório, devem ser levadas em consideração em etapas adequadas dos projetos.

No presente caso, a partir da experiência já adquirida em projeto anterior (o citado desenvolvimento do processo MIG/MAG com Pulsação Térmica), se determinou que o sistema a ser testado nas usinas hidrelétricas, já direcionado para aplicações posteriores, fosse o mais e integrado compacto possível. O ambiente tem mobilidade e espaço restritos. Equipamentos grandes e não integrados causariam distúrbios na movimentação do pessoal e materiais (que é intensa durante paradas para manutenção), além de tempo demasiado para instalação.

Em assim sendo, equipamentos que compõe a bancada de ensaios do laboratório (Figura 14) e proporcionaram flexibilidade de regulagem e testes, foram acondicionados em um único gabinete, que comporta unidade de controle, unidade de potência para o arco piloto e arco principal, ignitor de alta frequência para o arco piloto e válvulas de controle para o gás de arraste e o gás de plasma. O equipamento gerado pode ser visto na Figura 15.



Figura 14. Componentes da bancada de ensaios PTA-P em laboratório

O sistema está em funcionamento no LABSOLDA e será levado para aplicação já agendada em campo, em uma das usinas da Tractebel Energia. Espera-se identificar necessidades de melhorias técnicas e ergonômicas, que serão implementadas após a aplicação em campo.

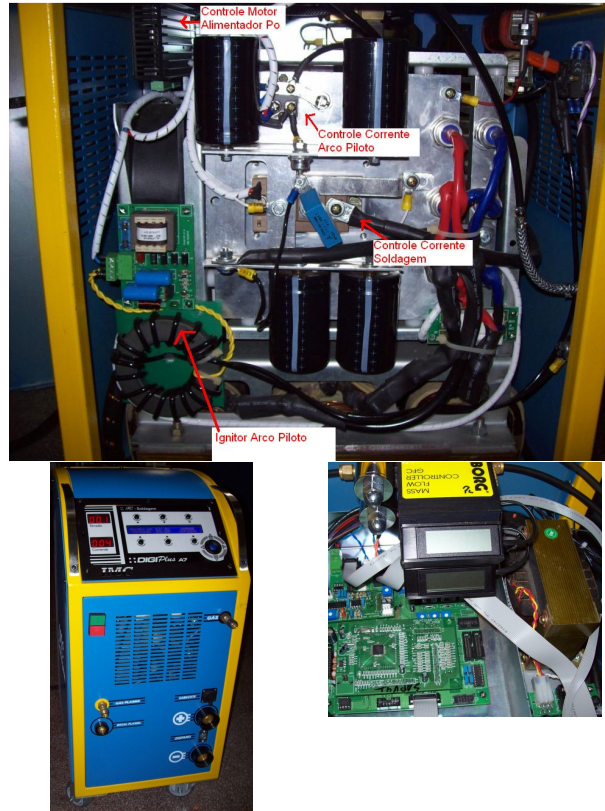


Figura 15. Sistema de Soldagem PTA-P dedicado

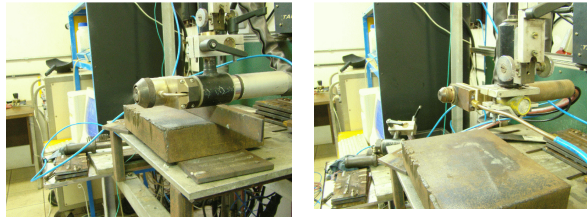
#### IV. TOCHA MANUAL COMPACTA PARA SOLDAGEM PTA-P MANUAL

Grande parte das tochas encontradas no mercado, para aplicações que exigem alta corrente de soldagem, tem dimensões que inviabilizam a aplicação manual. Projetos mais modernos são mais compactos, porém, necessitam de dois circuitos de refrigeração (o que aumentaria o ferramental a ser levado para dentro da usina). Portanto, era necessário projetar uma tocha que sobrepujasse essas duas desvantagens. Antes, porém, se realizou uma análise de tochas comerciais, uma normal e uma compacta, sendo que a primeira possui injeção interna de pó.

##### A. Comparação entre Tochas PTA-P: Injeção interna e externa de pó

Tendo em vista a aplicação relatada, o desempenho das tochas PTA-P quando utilizadas em soldas fora de posição deve ser um critério de tomada de decisão quanto às suas características construtivas. Deste modo, se realizaram testes para verificar o desbalanceamento da distribuição da alimentação de pó entre os orifícios injetores superiores e os inferiores, na posição vertical de soldagem (a que causaria maior desbalanceamento), uma vez que a diferença na injeção das partículas no arco poderia causar alterações em suas características térmicas e dinâmicas e nas da poça. Para isso, se

dividiu a coleta de pó realizada em 60 segundos (taxa de alimentação em regime) para os orifícios superiores e inferiores, para uma tocha com injeção interna e outra com injeção externa de pó, conforme Figura 16.



Tocha com injeção interna de pó

Tocha com injeção externa de pó

Figura 16. Verificação da distribuição de alimentação de pó na posição vertical de soldagem para diferentes tochas PTA-P

O ensaio varreu diferentes valores de vazão de gás de arraste e de pó, conforme o gráfico da Figura 17, que contém também os resultados para cada caso. Sabe-se que as condições sob arco de soldagem aberto são distintas, mas acredita-se esta ser uma boa indicação do comportamento em soldagem. Além disso, a realização desta verificação em soldagem seria tecnicamente inviável. O gráfico ilustra a porcentagem do material dosado pelo alimentador de pó injetada através dos orifícios superiores e inferiores de cada tocha. Pode-se observar, na mesma figura, a representação ilustrativa de ambos os modelos, se pode atentar para o fato de que, para a injeção externa, os jatos de pó são cilíndricos, através de orifícios concêntricos ao eletrodo; para injeção interna, o jato é anular, coaxial ao eletrodo, resultando em maior área transversal, e, portanto, redução na velocidade do fluido gás de arraste - pó.

Nota-se que há uma tendência à equalização (simetria entre a injeção através dos orifícios superiores e inferiores) somente em uma vazão de gás de arraste pelo “venturi” de 5,0 l/min, para injeção externa. Este valor, somado à vazão ao alimentador, resulta em 7,0 l/min à tocha, valor alto em relação aos citados na literatura.

Apesar de não fazer parte do objetivo previamente traçado do ensaio, uma informação determinante surgiu na análise dos resultados. A Tabela 4 mostra quantitativamente as taxas de pó injetadas pelos orifícios superiores e inferiores e a soma delas. Percebe-se que, para a tocha com injeção interna, mesmo para vazões mais altas de gás de arraste, existe acúmulo de pó em seu interior (que se intensifica para menores vazões).

Já para a tocha com alimentação externa não se observou este fenômeno. Foi realizado, então, um teste com uma vazão total de gás de arraste (gás através do “venturi” + gás ao alimentador de pó (2,0 l/min+1,5 l/min)) igual a 3,5 l/min, dentro da faixa usual para o processo e taxa de alimentação previamente regulada em 4,35 g/30s. A Figura 18 indica uma predominância de injeção pelos orifícios inferiores. Apesar disso, se observou que ainda há transporte completo do pó, sem acúmulo na tocha.

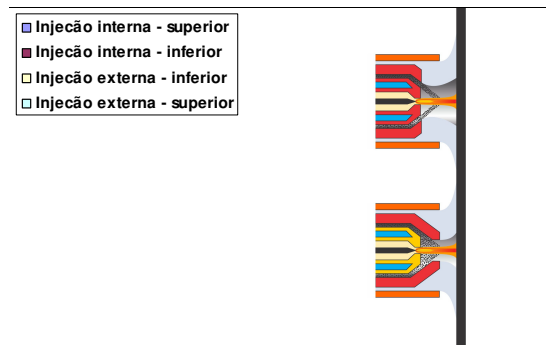
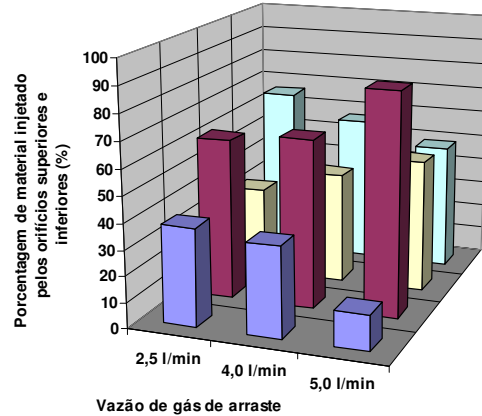


Figura 17. Distribuição da alimentação de pó à tocha para posição de soldagem vertical (acima: injeção externa, abaixo: injeção interna)

Tabela 4. Taxas de alimentação (valores médios) de pó separadas entre os orifícios injetores superiores e inferiores da tocha, para uma taxa de alimentação previamente regulada em 9,20 g/30s

Tocha com injeção externa				Tocha com injeção interna			
Vga	Ai	As	Tpi	Vga	Ai	As	Tpi
2,5	3,07	5,98	9,05	2,5	3,18	1,93	5,12
4,0	4,12	5,47	9,58	4,0	4,57	2,43	7,00
5,0	4,62	4,36	8,98	5,0	6,72	1,07	7,79
		média	9,24				
		desvio padrão	0,28 g				
Vga	Vazão de gás de arraste (l/min)						
Ai	Injeção inferior de pó (g/30s)						
As	Injeção superior de pó (g/30s)						
Tpi	Total de pó injetado em 1 minuto (g/30s)						

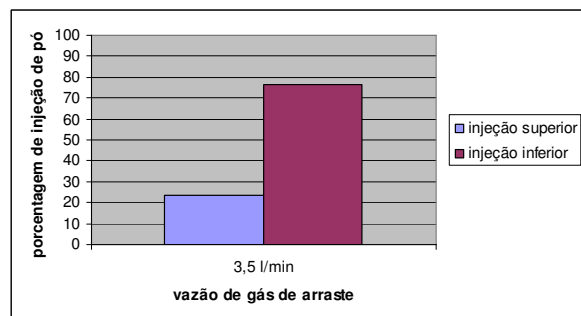


Figura 18. Distribuição da injeção de pó entre os orifícios inferiores e superiores da tocha com alimentação interna de pó (taxa de alimentação de 4,35 g/30s)

Os resultados já apresentaram, neste ponto, a tendência à adoção do modelo de injeção externa de pó para tochas PTA-P na seqüência dos trabalhos. Neste modelo, o princípio construtivo dos canais de pó da tocha não provoca o acúmulo de pó dentro da tocha, como no caso da tocha com injeção interna.

Para análise na posição sobrecabeça, se verificou a capacidade da tocha com injeção externa de pó em manter (ou alterar apenas levemente) o ponto focal de injeção de pó. A Figura 19 mostra o ponto focal geométrico e o efetivo verificado. Nota-se que se manteve coincidência.

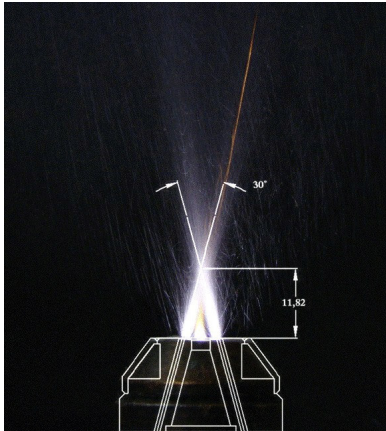


Figura 19. Coincidência entre o ponto focal de injeção de pó geométrico e efetivo, para a tocha com injeção externa de pó

Outro problema emergente na utilização da tocha com injeção interna foi a tendência a entupimento em taxas mais altas de alimentação de pó, como pode ser visto na Figura 20.

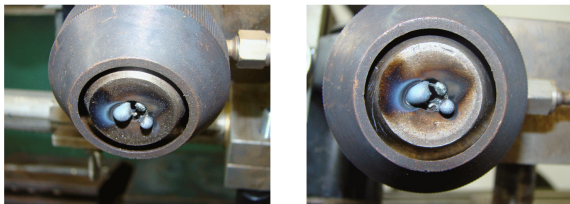


Figura 20. Tocha com injeção interna de pó e seus canais entupidos por material aderido (corrente de soldagem: 190 A, taxa de alimentação de pó: 17,5 g/min)

Em relação à geometria das soldas, mostradas na Figura 21, observa-se que, em maiores correntes a tocha com injeção interna tende mais a uma penetração do tipo finger shape, enquanto a tocha com injeção externa apresenta um cordão com mais molhabilidade.

73,1 A	112,3 A	73,6 A	113,4 A
151,5 A	191,4 A	152,3 A	192,7 A
Injeção interna		Injeção externa	

Figura 21. Comparação geométrica da seção transversal – tocha PTA-P com injeção interna x tocha PTA-P com injeção externa e respectivas correntes médias

### B. Melhorias na Tocha PTA-P

Tendo-se decidido por um modelo de tocha PTA-P quanto ao tipo de injeção de pó, outros fatores foram considerados para melhorias em seu projeto. A Figura 22 ilustra inovações na tocha PTA-P com injeção externa.

A nova geometria reduz o número de operações de braseagem necessárias, facilitando a construção. Além disso, se integraram os circuitos de refrigeração, reduzindo seu número a um, sem, no entanto, prejuízos à capacidade de refrigeração do bico constritor. Assim, se reduz o número de componentes do sistema. Para algumas das aplicações citadas, a possibilidade de tornar o sistema mais compacto e simples pode ser decisiva quando da tomada de decisão pela implantação de um processo, como por exemplo, no interior de caldeiras de termelétricas, de usinas hidrelétricas e em estaleiros.

Ainda com o requisito de maior simplicidade de operação em mente, se projetou um método de fixação do bico constritor que elimina a exigência da utilização de chaves e retirada de parafusos para sua retirada e reposição. O bico constritor tem vida útil limitada e também está exposto, principalmente nos ambientes citados, a danos. Sendo assim sua troca deve permitir agilidade.

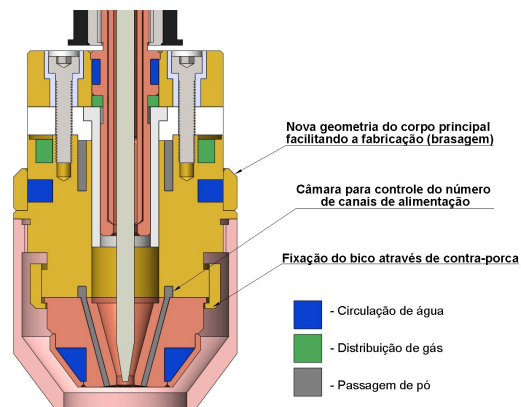


Figura 22. Inovações no projeto da tocha PTA-P



Seguindo sugestões de soldadores da Tractebel Energia que realizaram treinamento no LABSOLDA, outras implementações foram realizadas. Primeiramente, foi projetada uma proteção para a mão condutora da solda, contra a intensa radiação do arco. Ainda para melhorar a operacionalidade do sistema, se gerou uma unidade anexada a tocha, com quatro botões, para regulagem on-line, durante a soldagem, da energia e taxa de alimentação de pó. Ambas podem ser vistas na Figura 23 (em desenhos CAD) e estão sendo fabricadas para teste.

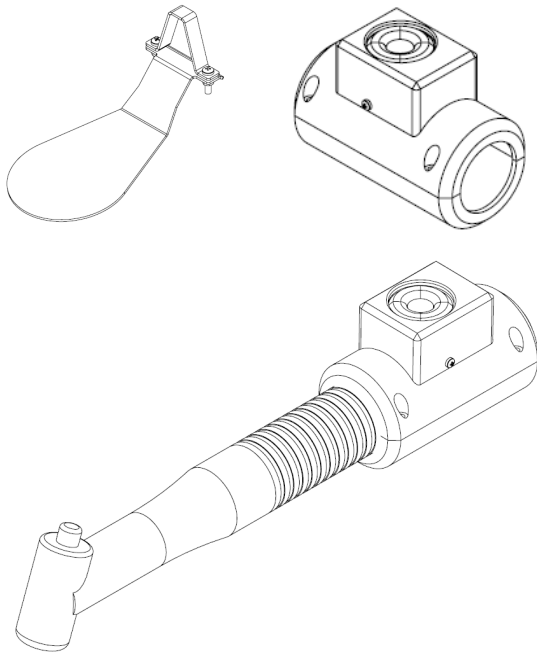


Figura 23. Proteção manual e unidade de regulagem de parâmetros de soldagem anexada à tocha (isolada e montada)

## V. APLICAÇÃO PELO PESSOAL DA TRACTEBEL ENERGIA

Uma das mais importantes atividades realizadas no âmbito do projeto de P&D foi a visita para treinamento de soldadores e técnicos da Tractebel Energia. Estes profissionais estão em constante e próximo contato com o problema atacado, que é a recuperação por soldagem de áreas cavitadas. Por isso, podem fornecer sugestões e subsídios para um direcionamento mais adequado dos trabalhos. As implementações mostradas na Figura 23 surgiram nesta ocasião.

A Figura 24 mostra uma solda realizada automaticamente, durante o treinamento.



Figura 24. Revestimento soldado automaticamente durante o treinamento com o pessoal da Tractebel nas dependências do LABSOLDA – Posição sobre-cabeça

Após algumas soldas automáticas, para apresentação do processo, os técnicos da Tractebel Energia tiveram a oportunidade de soldar manualmente, obtendo bons resultados em pouco tempo de treinamento (Figura 25).



Figura 25. Revestimento manual realizado por técnico da Tractebel Energia, com um dia de treinamento

## VI. CONCLUSÕES

De uma maneira geral, pôde-se averiguar que o PTA-P se trata de um processo viável, mas sensível às condições de contorno. Cada aplicação prevista deve ser precedida de um desenvolvimento dedicado, para que se alcance a qualidade realmente atingível pelo processo, pois as condições de deposição de material sofrem influência de diversos fatores, concomitantemente, como a posição de soldagem. Os principais fatos técnico-científicos conclusivos são:

- foi gerado o ADP-2, que se mostrou robusto sob diferentes solicitações e desempenho adequado ao longo de todo o trabalho. Implementações continuam sendo realizadas, principalmente quanto à fabricação da câmara de fluidização e do projeto e seleção de materiais das superfícies em atrito. Suas desvantagens em relação ao tipo comercial de válvula rotativa são sobrepujadas por suas vantagens;

- o sistema integrado, compacto, que unificou componentes necessários para soldagem PTA-P em um gabinete, apresentou boa resposta e robustez. Está sendo utilizado no LABSOLDA e será levado a campo em aplicação agendada;

- a tocha de soldagem PTA-P viabiliza o processo, direcionando o pó adequadamente ao arco e à poça, e mantendo um arco rígido e com adequada geometria e rigidez do arco, de modo que o pó se incorpore à poça metálica e que esta seja mantida e estabilizada. A tocha com injeção externa obteve resultados satisfatórios em soldagem e viabilizou operações em posições forçadas, o que, somado ao fato de ser mais compacta, foi selecionada em detrimento de uma tocha com injeção interna de pó. O novo modelo conceitualizado prevê maior simplicidade construtiva, operativa, com apenas um circuito de refrigeração e botões de regulação de parâmetros (corrente de soldagem e taxa de alimentação de pó) na própria tocha;

## VII. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a toda equipe do LABSOLDA, pelo esforço e apoio prestados. Agradecimento especial também é dirigido à equipe técnica da Tractebel Energia, pelo envolvimento e interação no trabalho.

## VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Atlas da Energia Elétrica do Brasil. ANEEL. 3ª Ed., 233 p.. Brasília, 2008
- [2] Relatório Anual de Sustentabilidade. TRACTEBEL ENERGIA. 150 p., 2007
- [3] Processo de Soldagem MIG/MAG Pulsado com Pulsção Térmica ou Duplamente Pulsado. Carta Patente PI0004698-1, INPI, 13/03/2007
- [4] DUTRA, J. C. Sistema e processo de soldagem - Vencendo a erosão das turbinas hidráulicas de grande porte. Energia para o MERCOSUL: Edição 2004 do Prêmio MERCOSUL de Ciência e Tecnologia, Brasília, p. 101-113, Ago. 2005.
- [5] SILVA, R. H G. Inovações em Equipamentos e em Parametrização no Processo de Revestimento por Plasma-Pó (PTA-P). 2010. 301 f.. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [6] DILTHEY, U. et al. Kombinertes Plasma-Pulver-Auftragschweißen. Schweissen und Schneiden, n. 5, p. 241-244. mai. 1993
- [7] DEUIS, R. L. et al. Metal-matrix composite coatings by PTA surfacing. Composites Science and Technology, v.58, n. 2, p. 299-309, 1998
- [8] XIBAO, W.; HUA, L. Metal Powder Thermal Behavior during the Plasma Transferred-arc Surfacing Process. Surface and Coatings Technology, v. 106, n. 1-2, p. 156-161. ago.1998
- [9] RIBEIRO, H. O. Desenvolvimento de Ligas para Revestimentos por PTA Resistentes à Cavitação. 2007. 167 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina
- [10] MARCONI, M. I Riporti duri con polveri saldate con il processo P.T.A. (Plasma ad Arco Trasferito). Livro Online (www.plasmateam.com), 320 p. 2002.
- [11] BOHORQUEZ, C. E. N. Relatório de Ensaio da Taxa de Alimentação de Pó. Relatório Interno LABSOLDA, 8 p.. Florianópolis, 26/06/2008