



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DE SOLDAS SUBAQUÁTICAS MOLHADAS EM  
POSIÇÃO SOBRE CABEÇA.**

**LUIS EDMUNDO RAMÍREZ LUNA**

Belo Horizonte, 5 de Abril de 2013

Luis Edmundo Ramírez Luna

## **ESTUDO DE SOLDAS SUBAQUÁTICAS MOLHADAS EM POSIÇÃO SOBRE CABEÇA.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais,  
como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia  
Mecânica.

**Área de concentração:** Processos de Fabricação por Soldagem

**Orientador:** Prof. Alexandre Querioz Bracarense

**Co-orientador:** Ezequiel Caires Pereira Pessoa

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
2013



**Universidade Federal de Minas Gerais**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**  
Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha – 31.270-901 – Belo Horizonte - MG  
Tel.: +55 31 3499-5145 – Fax.: +55 31 3443-3783 e-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

## **ESTUDO DE SOLDAS SUBAQUÁTICAS MOLHADAS EM POSIÇÃO SOBRE CABEÇA.**

**LUIS EDMUNDO RAMÍREZ LUNA**

Dissertação defendida e aprovada em 5, de Abril de 2013, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **"Mestre em Engenharia Mecânica"**, na área de concentração de **"Processos de Fabricação"**.

Por

***PROF. ALEXANDRE QUEIROZ BRACARENSE***

Orientador – Ph.D., Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG

***PROF. EZEQUIEL CAIRES PEREIRA PESSOA***

Examinador – Doutor, Instituto Federal Minas Gerais, Campus Congonhas

***Dr. ROBERTO DE LORENZO***

Examinador – Doutor, CDTN

***DR. Valter Rocha dos Santos***

Examinador – PUC Rio

Animo, Êxito, Jubilo !!

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pela oportunidade de viver a experiência.

A meus pais Luis Ramírez e Maria Eugenia e irmãos Eduardo e Ivonne e familiares pelo amor e apoio incondicional.

Ao Professor Alexandre Queiroz Bracarense pela oportunidade e disponibilidade apresentada desde o primeiro contato, assim como os constantes ensinamentos.

Ao Professor Ezequiel pela ajuda e constante orientação nas atividades no LRSS.

Ao pessoal do LRSS e alunos de graduação em Engenharia Mecânica especialmente a Fernando Soares, Daniel Cabral, Vinicius Santiago e doutorandos Ariel Rodriguez e Claudio Turani.

A minha namorada Patricia Costa pelo apoio total na elaboração do trabalho assim como o carinho de sempre.

A ELBRAS pelo fornecimento de material e eletrodos.

Ao CNPq pelo suporte financeiro.

A toda aquela pessoa envolvida na elaboração deste trabalho.

Meus sinceros agradecimentos.

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE TABELAS .....	ix
LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS .....	x
LISTA DE EQUAÇÕES .....	xi
RESUMO .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO E OBJETIVO .....	14
cabeça .....	15
1.1. Objetivos .....	16
consultadas no desenvolvimento do trabalho .....	16
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	17
2.1. Soldagem subaquática .....	17
2.2. Efeito da Polaridade na Soldagem Molhada .....	19
2.3. Condições da Soldagem Subaquática Molhada .....	21
2.4. Considerações metalúrgicas nas soldas molhadas .....	22
2.5. Dano por hidrogênio .....	23
2.6. Porosidade na solda subaquática molhada .....	24
2.7. Medição de porosidade .....	29
CAPÍTULO 3 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	34
3.1. Materiais .....	34
3.2. Equipamentos Utilizados .....	35
3.3. Procedimento experimental .....	39
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	43
4.1. Inspeção Visual .....	43
4.2. Geometria do Cordão de solda .....	48
4.3. Porosidade no metal de Solda .....	54
4.4. Dureza no metal de solda .....	70
4.5. Microestrutura presente nas soldas .....	73
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES .....	80
CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	82
RERERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	83

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Modalidades de Soldagem Subaquática (Łabanowski, 2008).....	17
Figura 2.2. Processo de soldagem SMAW.....	18
Figura 2.3. Faixa de tensão-corrente para diferentes pressões de soldagem para eletrodo revestido (1 Bar = 10 metros de coluna d'água) (IBARRA, 1994).....	18
Figura 2.4. Relação do termo polaridade e a conexão de eletrodo.....	19
Figura 2.5. Desenho esquemático do efeito da polaridade na geometria do cordão de solda e comprimento do arco na soldagem subaquática molhada (PESSOA, 2004).....	20
Figura 2.6. Variação da quantidade de constituintes microestruturais do metal de solda em Função da profundidade de soldagem na água. (IBARRA, 1987).....	23
Figura 2.7. Efeito da pressão na porosidade.....	25
Figura 2.8. Efeito da pressão de água na forma do cordão (SUGA, 1986).....	26
Figura 2.9. Variação da porosidade ao longo do cordão de solda para soldas feitas em aço A-36 a 50 m. (PESSOA, 2007).....	27
Figura 2.10. Variação da porosidade ao longo de cordão de soldadura para soldas feitas em aço A-36 a 100 m. (PESSOA, 2007).....	27
Figura 3.1. Corpo de prova para soldagem sobre chapa, cotas em mm.....	35
Figura 3.2. Fotografia da câmara para soldagem hiperbárica.....	36
Figura 3.3. Dispositivo de soldagem por gravidade - flutabilidade.....	38
Figura 3.4 Metodologia para retirada das amostras nos testes de deposição sobre chapa.....	40
Figura 4.1. Aparência de cordões feitos com ângulo de chapa a 10° e 10 m de profundidade.....	43
Figura 4.2. Aparência de cordões feitos com ângulo de chapa a 10° e 50 m de profundidade.....	44
Figura 4.3 Aparência de cordões feitos com ângulo de chapa a 30° e 10 m de profundidade.....	45
Figura 4.4 Aparência de cordões feitos com ângulo de chapa a 30° e 50 m de profundidade.....	46
Figura 4.5 Aparência de cordões feitos com ângulo de chapa a 70° e 10 m de profundidade.....	46
Figura 4.6 Aparência de cordões feitos com ângulo de chapa a 70° e 50 m de profundidade.....	47
Figura 4.7. Parâmetros medidos no cordão.....	48
Figura 4.8. Comparação de cordões obtidos com ângulo de chapa 10°, ângulo trabalho 40° a 10 e 50 m.....	50
Figura 4.9. Comparação de cordões obtidos com ângulo de chapa 30°, ângulo trabalho 40° a 10 e 50 m.....	51
Figura 4.10. Comparação de cordões obtidos com ângulo de chapa 70°, ângulo de trabalho 40° a 10 e 50 m.....	51
Figura 4.11. Média de porosidade em função a profundidade e ângulo de chapa.....	54
Figura 4.12. Média do % porosidade dos 3 cordões para ângulo de chapa 10° a 10 m.....	56
Figura 4.13. Média do % porosidade dos 3 cordões para ângulo de chapa 30° a 10 m.....	56
Figura 4.14. Média da % porosidade dos 3 cordões para ângulo de chapa 70° a 10 m.....	56
Figura 4.15. Distribuição da porosidade a 10 m para cada ângulo de chapa e ângulo de trabalho.....	57

Figura 4.16. Média do % porosidade dos 3 cordões para ângulo de chapa 10° a 50 m.....	57
Figura 4.17. Média do % porosidade dos 3 cordões para ângulo de chapa 30° a 50 m.....	58
Figura 4.18. Média do % porosidade dos 3 cordões para ângulo de chapa 70° a 50 m.....	58
Figura 4.19. Distribuição da porosidade a 50 m para cada ângulo de chapa e ângulo de trabalho.....	59
Figura 4.20. Média de porosidade para todas as condições de soldagem.....	60
Figura 4.21. Média de distribuição de poros em soldas feitas com chapa a 10° nas duas profundidades.....	61
Figura 4.22. Média de distribuição de poros em soldas feitas com chapa a 30° nas duas profundidades.....	62
Figura 4.23. Média de distribuição de poros em soldas feitas com chapa a 70° nas duas profundidades.....	62
Figura 4.24. Média de distribuição dos poros obtidos na configuração de ângulo de chapa a 10° e ângulo de trabalho a 40°.....	63
Figura 4.25. Porosidade presente em solda feita a 10 m de profundidade com ângulo de chapa 10° e ângulo de trabalho 40°.....	63
Figura 4.26. Porosidade presente em solda feita a 50 m de profundidade com ângulo de chapa 10° e ângulo de trabalho 40°.....	63
Figura 4.27. Distribuição da porosidade em soldas com chapa a 10° e ângulos de trabalho 40°, 50°, 60°.....	66
Figura 4.28. Distribuição da porosidade em soldas com chapa a 30° e ângulos de trabalho 40°, 50°, 60°.....	67
Figura 4.29. Distribuição da porosidade em soldas com chapa a 70° e ângulos de trabalho 40°, 50°, 60°.....	68
Figura 4.30. Zonas no cordão nas quais foi medida dureza.....	70
Figura 4.31. Comparação de durezas na condição a 10 m.....	71
Figura 4.32. Comparação de durezas na condição a 50 m.....	71
Figura 4.33. Comparativo de durezas máximas a 10 e 50 m.....	72
Figura 4.34. Comparativo de durezas mínimas a 10 e 50 m.....	72
Figura 4.35. Metalografias para solda a 10 metros, ângulo de chapa 10° e ângulo trabalho 40°. Aumento 500X.....	74
Figura 4.36. Metalografias para solda a 50 metros, ângulo de chapa 10° e ângulo trabalho 40°. Aumento 500X.....	75
Figura 4.37. Metalografias para solda a 10 metros, ângulo de chapa 30° e ângulo trabalho 40°. Aumento 500X.....	76
Figura 4.38. Metalografias para solda a 50 metros, ângulo de chapa 30° e ângulo trabalho 40°. Aumento 500X.....	77
Figura 4.39. Metalografias para solda a 10 metros, ângulo de chapa 70° e ângulo trabalho 40°. Aumento 500X.....	78
Figura 4.40. Metalografias para solda a 50 metros, ângulo de chapa 70° e ângulo trabalho 40°. Aumento 500X.....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Composição química de poros em soldas molhadas.....	28
Tabela 3.1. Composição química e carbono equivalente utilizado nos testes.....	34
Tabela 3.2. Valores de correntes aplicadas para os testes a 10 m.....	40
Tabela 3.3. Valores de correntes aplicadas para os testes a 50 m.....	41
Tabela 4.1 - Quantidade de defeitos por condição.....	47
Tabela 4.2 - Média das medidas de largura, reforço e penetração para cada uma das condições de solda.....	48
Tabela 4.3. Média de seções medidas no cordão e média de velocidade por condição.....	49
Tabela 4.4. Dimensões obtidas com ângulo chapa a 10° a 10 m. Unidades mm.....	52
Tabela 4.5. Dimensões obtidas com ângulo chapa a 30° a 10 m. Unidades mm.....	52
Tabela 4.6. Dimensões obtidas com ângulo chapa a 70° a 10 m. Unidades mm.....	52
Tabela 4.7. Dimensões obtidas com ângulo chapa a 10° a 50 m. Unidades mm.....	53
Tabela 4.8. Dimensões obtidas com ângulo chapa a 30° a 50 m. Unidades mm.....	53
Tabela 4.9. Dimensões obtidas com ângulo chapa a 70° a 50 m. Unidades mm.....	53
Tabela 4.10. Média de distribuição da porosidade por cordão para cada ângulo de chapa.....	55
Tabela 4.11. Média dos 3 cordões por condição a 10 m.....	57
Tabela 4.12. Média dos 3 cordões por condição a 50 m.....	59
Tabela 4.13. Distribuição de porosidade segundo profundidade e ângulo da chapa.....	61
Tabela 4.14. Distribuição do percentual de porosidade por condição de solda.....	65
Tabela 4.15. Nomenclatura das fases no metal de solda.....	73

## LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

CE	Carbono equivalente
AWS	American Welding Society
SMAW	Shield metal arc welding
Par	Peso ao ar
Pag	Peso em água destilada
E	Empuxo
Vld	Volume de líquido deslocado
Vam	Volume de amostra
$\rho_{am}$	Densidade real da amostra
$\rho_{amperf}$	Densidade de amostra perfeita
MB	Metal base
GF	Grão fino
GG	Grão grosseiro
ZF	Zona fundida
IAV (A)	Corrente de habilitação
TM	Tempo de manutenção
VCC (V)	Tensão curto circuito
ICC	Corrente curto circuito

## LISTA DE EQUAÇÕES

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad \text{EQ. 1...21}$$

$$P_{\text{ext}} = P_{\text{hid}} + h_1\rho_1 + h_2\rho_2 + 2\sigma/r \quad \text{EQ. 2...24}$$

$$P_{\text{gas}} > P_{\text{hid}} + 2\sigma/r \quad \text{EQ. 3...25}$$

$$V_{\text{id}} = V_{\text{am}} = \frac{E}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} * g \quad \text{EQ. 4...30}$$

$$\rho_{\text{am}} = \rho_{\text{ar}}/V_{\text{am}} \quad \text{EQ. 5...30}$$

$$V_v = \frac{\rho_{\text{amperf}} - \rho_{\text{am}}}{\rho_{\text{amperf}}} \times 100 \quad \text{EQ. 6...30}$$

## RESUMO

A complexidade da posição sobre cabeça e a importância que a porosidade representa na qualidade da solda, levam à necessidade de compreender a quantidade e distribuição dos poros no metal de solda e sua dependência dos ângulos de trabalho e de chapa nos quais as soldas são feitas. As variações de ângulos também influenciam a dureza e morfologia do cordão de solda.

Com o objetivo de conhecer os resultados de aparência de cordão de solda, morfologia do cordão de solda, dureza do metal de solda, microestrutura na ZTA e metal de solda, porosidade e localização dos poros desenvolveu-se um sistema mecanizado para soldagem subaquática molhada na posição sobre cabeça. As soldas se realizaram com eletrodo rutílico especificação AWS E6013 envernizados manualmente em profundidades de 10 e 50 metros com ângulos de chapa de 10°, 30° e 70° e ângulos de trabalho de 40°, 50° e 60°.

Os resultados mostraram que a porosidade é fortemente dependente da profundidade, que para soldas feitas a 10 metros de profundidade, a porosidade é distribuída aproximadamente 50 % na penetração e 50 % no reforço do cordão, enquanto que, para soldas feitas a 50 metros de profundidade a porosidade é distribuída aproximadamente 70 % na penetração e 30 % no reforço. Observou-se que, conforme aumenta o ângulo da chapa com relação à horizontal a porosidade aumenta em até 36 % a 10 metros e até 22 % a 50 metros de profundidade. A dureza no metal de solda também é influenciada diretamente pelo ângulo da chapa já que em menores ângulos de chapa os valores de dureza são menores.

***Palavras Chaves:*** Soldagem subaquática molhada; Porosidade; Ângulo soldagem.

## ABSTRACT

The complexity of the overhead position and the importance of the pores in the welding quality, make necessary understand the distribution and location of porosity and his dependence of the angles with the ones the welds are made. These changes in work angle influence the welding metal hardness and morphology of the welding bead.

With the intention to know the results in the weld bead appearance, weld bead morphology, weld metal hardness, microstructure in HAZ and weld metal, porosity and location was developed a mechanized device to weld underwater wet weld in overhead position. The welds were made with rutillic electrode AWS specification E6013 manually varnished at deeps of 10 and 50 meter with the plate angles  $\alpha$  of 10°, 30° and 70° degrees and work angles  $\beta$  of 40°, 50° and 60° degrees.

The results show that the porosity it's highly dependent of the deep. To welds made at 10 meters deep the porosity its distributed 50% in the penetration and 50% in the reinforcement, while welds made at 50 the porosity its distributed 70% in the penetration and until 30% in the reinforcement.. Likewise, increasing the plate angle the porosity increase up to 36% at 10 meters and 22% at 50 meters. The hardness in weld metal it's influenced directly with the plate angle  $\alpha$ , since smallest plate angle, lowest values of hardness.

***Key Words:*** Underwater wet welding; Porosity; Welding angle.

## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO E OBJETIVO

A soldagem subaquática molhada tem sido usada como técnica de reparo de estruturas de aço a mais de 42 anos (MISHLER, 1970). Atualmente pesquisa realizada no LRSS tem estudado, e em alguns casos melhorando, a aparência e propriedades mecânicas das soldas, mas todas elas foram feitas em posições plana ou vertical (ANDRADE L. G., 2008).

Os problemas que a soldagem subaquática molhada apresenta são poros, trincas, redução de tenacidade e resistência, instabilidade de arco, aprisionamento de escória e falta de fusão. No caso do estudo deste trabalho, a porosidade é o enfoque principal, já que pela primeira vez será documentado as experiências de se soldar a 1 e 5 atm de pressão em posição sobre cabeça em laboratório. Para isso foi necessário realizar testes de prova desde zero. Primeiro foi necessário construir um mecanismo de soldagem por gravidade e flutuação que fosse capaz de soldar na posição sobre cabeça. Depois foi preciso mexer com os ângulos de chapa  $\alpha$ , ângulo de trabalho  $\theta$  e valores de corrente até conseguir uma abertura de arco que repetitiva. Durante a experimentação com a corrente descobriu – se que é preciso aplicar um alto valor de corrente no início da solda (IAV) por um determinado tempo (TM), para depois diminuí-la até o valor de corrente com a qual a solda será feita; isso por que quando é realizada solda sobre cabeça, a gota de metal de solda tem que ir contra a gravidade, sendo necessária uma maior corrente para manter por mais tempo o metal em estado líquido e conseguir a abertura do arco, se não, a ponta do eletrodo colava na chapa. Já conhecidos os parâmetros para conseguir a boa repetibilidade nas soldas sobre cabeça iniciou – se com os testes desenvolvidos neste trabalho.

Vários trabalhos (SUGA, 1986) e (PESSOA E. B., 2003) falam sobre o mecanismo de formação e localização dos poros, mas todos eles desenvolvidos na posição plana de soldagem.

Com o objetivo de coletar informações sobre o agrupamento, forma e tamanho dos poros, bem como a geometria do cordão de solda, testaram - se diferentes ângulos da chapa, ângulos de trabalho do eletrodo e profundidades sempre usando eletrodo rutílico classificado como AWS E6013 envernizado manualmente com verniz vinílico.

O dispositivo com o qual foram feitas as soldas permite trabalhar com a faixa de ângulos definidos pela AWS como sobre cabeça (desde 0° até 80° respeito ao plano

horizontal) e com ângulos de trabalho desde 10° até 90°, mas no presente estudo foram usados 40° 50° e 60° já que os experimentos preliminares demonstraram serem os que apresentam uma fácil abertura de arco. Além de possibilitar a solda em todas as posições sobre cabeça, o dispositivo permite soldar em posição plana e vertical.

Os resultados mostram que a porosidade depende da profundidade (PESSOA E. B., 2003), e que quando o ângulo da chapa tende a ser mais vertical a aparência do cordão piora e a porosidade aumenta.

É por tais motivos que este trabalho é de grande importância já que estabelece as bases para um longo caminho na pesquisa de soldagem subaquática molhada na posição sobre cabeça.

## 1.1. Objetivos

Esse trabalho tem como objetivo avaliar a influência dos ângulos de trabalho, ângulos de chapa e diferentes profundidades de solda na formação, distribuição, quantidade de poros e na aparência do cordão de solda. Também foi avaliada a microestrutura obtida. Análise visual, estudo da morfologia do cordão e medição da porosidade assim como medições de dureza foram realizados para verificar a influência das variáveis descritas anteriormente.

Esse documento contém seis capítulos, como se seguem: O capítulo 1 apresenta uma breve introdução ao assunto, O capítulo 2 contém informações extraídas da literatura, em tópicos relacionados à soldagem por eletrodo revestido, à soldagem subaquática, à porosidade e as posições de soldagem. O capítulo 3 relata os procedimentos experimentais realizados como parte desse trabalho, detalhando os matérias e os métodos utilizados. O capítulo 4 apresenta os resultados dos testes obtidos, assim como uma discussão do mesmo. O capítulo 5 lista as conclusões desse trabalho, e o capítulo 6 breves recomendações para trabalhos futuros que o autor acredita contribuir para aumentar a qualidade das soldas subaquáticas. Ao final do documento é mostrada uma lista das referências bibliográficas consultadas no desenvolvimento do trabalho.

## CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Soldagem subaquática.

A soldagem subaquática apresenta três modalidades para ser feita (ŁABANOWSKI, 2008) as quais são:

- Soldagem Subaquática molhada.
- Soldagem em cavidade local.
- Soldagem subaquática seca.

Elas são descritas na Figura 2.1.

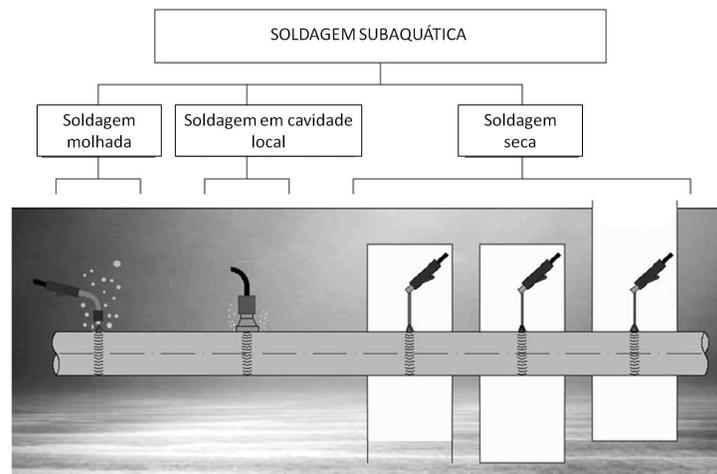


Figura 2.1. Modalidades de Soldagem Subaquática (Łabanowski, 2008).

A soldagem subaquática pode ser realizada à pressão ambiente (menos de 5 m de profundidade) ou em profundidades maiores, onde cada 10 m equivalem a 1 atm. O soldador – mergulhador está na água e não existe barreira mecânica entre o arco e a água. A simplicidade deste processo permite soldar inclusive em estruturas mecanicamente complexas. A técnica de soldagem subaquática mais utilizada é soldagem com eletrodo revestido. Isso devido à simplicidade de trabalhar, facilidade de deslocamento de equipe e a mais importante, o baixo custo de operação (GRUBBS, 1998) (YA, 2000) (PESSOA, 2007).

O processo de SMAW, ilustrado na Figura 2.2, é atualmente realizado a profundidades de até 100 m (Łabanowski, 2008). Em ambiente aquático a taxa de resfriamento em soldas é muito mais elevada do que aquelas obtidas nas soldas secas. Na faixa de temperatura de 800 – 500 °C é possível mudar de 415 a 56 °C/s. Isto

provoca uma perda de ductilidade do metal de solda e da zona afetada pelo calor (ZAC). Os poros estão presentes na maioria das soldas feitas a profundidades maiores a 5 m de profundidade (SUGA, 1986). Os principais fatores que afetam este fenômeno são: profundidade, fluxo do eletrodo e estabilidade do arco. (PESSOA E. B., 2003).

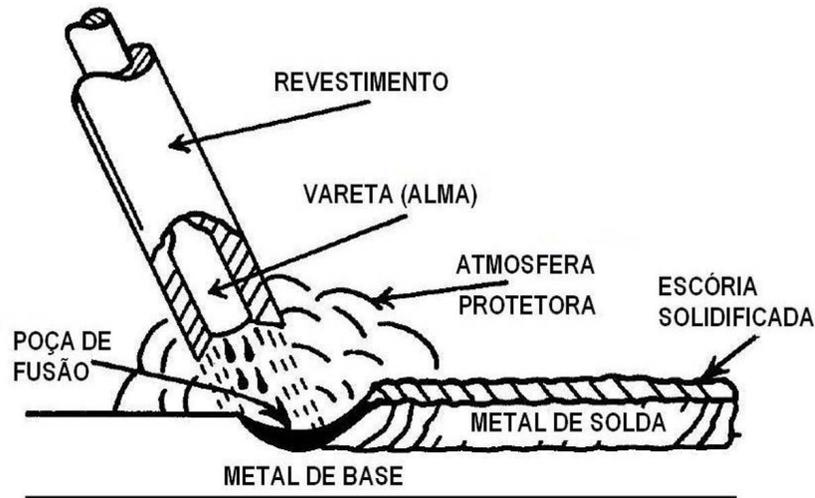


Figura 2.2 Processo de soldagem SMAW.

Com o aumento da profundidade ou pressão, fontes de energia mais potentes são requeridas para a abertura e manutenção do arco elétrico e, também a faixa tensão-corrente na qual se podem produzir soldas molhadas de boa qualidade diminui. (IBARRA S. G., 1994). A Figura 2.3 mostra tal relação.

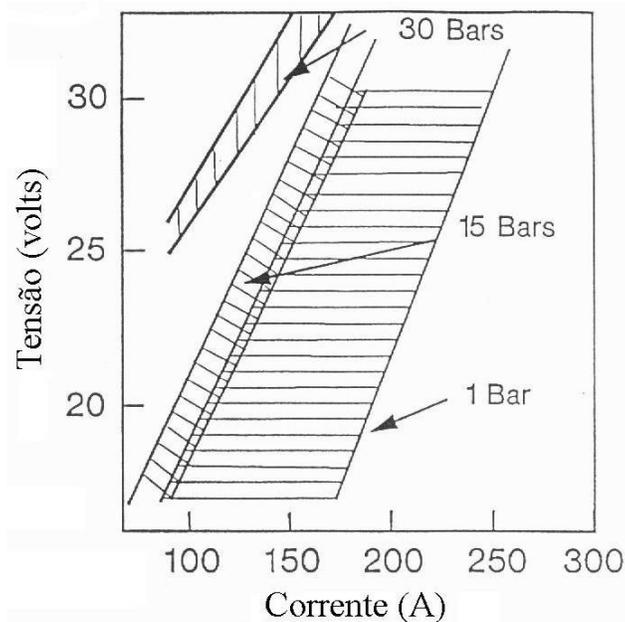


Figura 2.3. Faixa de tensão-corrente para diferentes pressões de soldagem para eletrodo revestido (1 Bar = 10 metros de coluna d'água) (IBARRA, 1994).

### 2.1.1. O processo de soldagem com eletrodos revestidos.

O processo de soldagem subaquática molhada com eletrodos revestidos é muito similar ao processo de soldagem com eletrodo revestido usado na superfície. Um arco é formado entre a ponta metálica do eletrodo e a peça a soldar. O metal de aporte é fornecido pelo metal fundido do eletrodo o qual é manipulado pelo soldador/mergulhador. O arco é mantido em um plasma de alta temperatura, que está cercado por uma bolha gasosa. Devido à abundância de  $H_2O$ , o plasma pode conter 90% de hidrogênio ionizado, e a bolha quantidades variáveis de  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$  e  $CO_2$ , vapor e outros elementos. Revestimentos de queima lenta nos eletrodos permitem a técnica de arraste. O eletrodo padrão E6013 de 5/32 ou 3/16 polegadas de diâmetro tem sido mais utilizado embora pesquisas recentes indicam que a qualidade da solda melhorou com eletrodos oxi-rutilicos. (SANTOS, 2010)

### 2.2. Efeito da Polaridade na Soldagem Molhada

O termo polaridade é usado para indicar a ligação elétrica do eletrodo nas terminais da máquina de soldagem. Quando o cabo do eletrodo é ligado ao positivo da fonte é conhecido como corrente direta eletrodo positivo CDEP (polaridade invertida). Quando ligado ao negativo da fonte é conhecido como corrente direta eletrodo negativo CDEN (polaridade direta). Na Figura 2.4 se apresenta a relação do termo polaridade e a conexão de eletrodo.

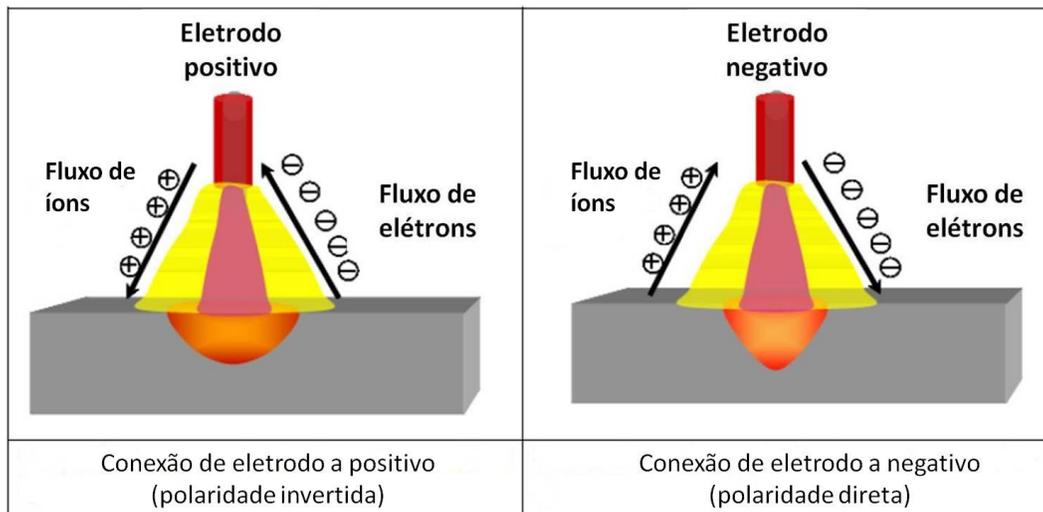


Figura 2.4. Relação do termo polaridade e a conexão de eletrodo.

Pesquisadores recomendam o uso de (CDEN) para soldas subaquáticas molhadas (LIU, 1994) (SILVA E. A., 1971). O motivo é evitar corrosão eletrolítica do porta-eletrodo e melhoras no desempenho na hora de soldar. Mas as opiniões sobre o tipo de corrente a usar são muito variadas já que pesquisadores referem que a utilização de CDEP resulta em soldas com melhor aparência no cordão de solda (ANDRADE L. G., 2008), assim como fabricantes que determinam o uso de CDEP para seus produtos (ABSON, 1996); mas também há os pesquisadores que apoiam a ideia que CDEN é a melhor opção para solda subaquática molhada por causa dos melhores resultados (LIU, 1994) e (SILVA E. A., 1971).

Dependendo da polaridade utilizada, pode ser controlada a aparência do cordão e a penetração. Na CDEN, 80% do calor fica na chapa, 15% é tirado fora por gases do fluxo queimado e 5% do calor fica na ponta do eletrodo. Enquanto que para CDEP 80% do calor fica na ponta do eletrodo, 15% é tirado fora por gases do fluxo queimado e 5% na chapa (TSAI C. L., 1977).

O acima mencionado modifica o tamanho do cone formado pelo fluxo do eletrodo, onde CDEP vai produzir um cone de maior comprimento o qual protege a coluna do arco durante a soldagem subaquática molhada reduzindo a taxa de solidificação da poça de fusão (PESSOA, 2004). Este fato é ilustrado na Figura 2.5.

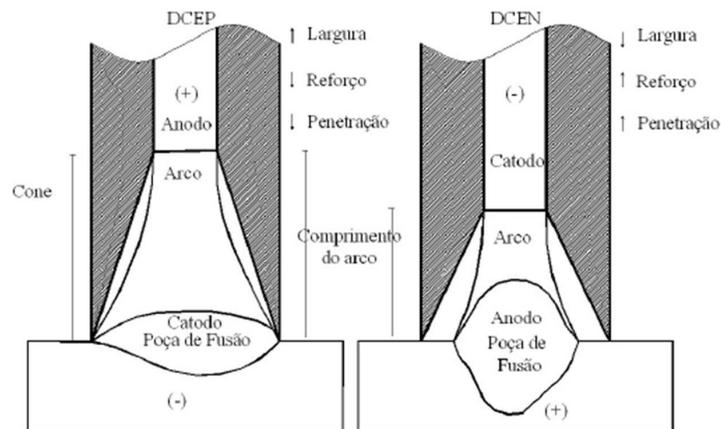


Figura 2.5. Desenho esquemático do efeito da polaridade na geometria do cordão de solda e no comprimento do arco na soldagem subaquática molhada. (PESSOA, 2004)

Em mecanismos de soldagem por flotabilidade e gravidade a ponta do eletrodo sempre toca a peça de trabalho, o que faz com que se espere um comprimento de arco menor para soldas feitas com eletrodo negativo em relação às soldas feitas com eletrodo positivo. O maior comprimento de arco reduz a possibilidade de ocorrência de curto-

circuito e aumenta a possibilidade de aprisionamento de hidrogênio nas gotas durante sua formação e transferência dentro do arco elétrico (POPE A. M., 1995).

### 2.3. Condições da Soldagem Subaquática Molhada

Como foi falado anteriormente, existem várias modalidades para realizar a soldagem subaquática, mas o método mais utilizado é aquele no qual o soldador-mergulhador assim como o arco elétrico estão em contato direto com a água. Por causa da alta temperatura gerada na ponta do eletrodo, a água que fica em contato com o plasma, produto da abertura de arco, é dissociada em  $H_2O$ ,  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $H$  e  $O$  (PUCHOL, 2009).

Os produtos fundamentais da decomposição da água (hidrogênio e oxigênio) interagem com a gota metálica e seu desprendimento da ponta do eletrodo formam poros, trincas e inclusões não metálicas, que produzem uma diminuição considerável das propriedades mecânicas do cordão (SUGA, 1986).

As bolhas geradas pela queima do fluxo e o vapor de água protegem o ambiente de soldagem. A energia do arco é muito intensa e gera bolhas de água que são imediatamente vaporizadas. A decomposição dos gases do fluxo fazem a bolha crescer. A bolha cresce até atingir um raio crítico e desprende. Imediatamente após o desprendimento já está se formando uma nova e o arco elétrico está sempre protegido pela bolha.

O tempo de resfriamento de  $800^{\circ}C$  a  $500^{\circ}C$  na soldagem molhada pelo processo SMAW tem uma faixa de 1 a 6 segundos, dependendo da energia de soldagem (de 0,8 a 3,6 kJ/mm) e da espessura da chapa. (TSAI, 1979). Como exemplo, a taxa de resfriamento de  $800^{\circ}C$  a  $500^{\circ}C$  a 1 mm da linha de fusão na superfície da chapa é 0,72 seg. quando a velocidade de solda é 228,6 mm/min. Ele muda para 1,23 segundos quando a velocidade de soldagem diminui a 152,1 mm/min. Uma pequena diminuição na velocidade de soldagem em soldagem subaquática molhada pode reduzir a taxa de resfriamento na ZTA (POPE, 1995).

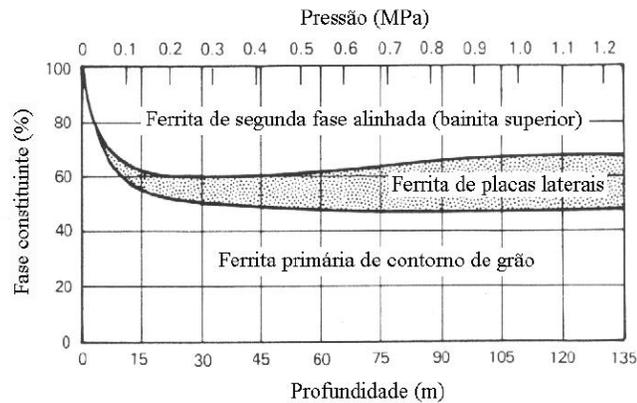
## 2.4. Considerações metalúrgicas nas soldas molhadas

O maior problema com soldagem subaquática molhada é a rápida têmpera que a solda recebe devido ao ambiente aquático. Tem sido reportado que o efeito de têmpera é o primeiro em acontecer na chapa e não a transferência do calor diretamente para a água (BROWN & MASUBUCHI., 1975). Esta perda condutiva de calor rápida depende da movimentação da água gerada pelas bolhas ascendentes, produto do arco de soldagem (TSAI, 1979). As taxas de resfriamento em soldas subaquáticas molhadas é 10 a 15 vezes mais rápidas que as soldas feitas ao ar (GOOCH, 1983). Esta rápida têmpera causa uma microestrutura significativamente distinta no metal de solda e na zona termicamente afetada (ZTA) quando é comparada com soldas feitas ao ar. Tem sido reportado (BROWN & MASUBUCHI., 1975) que a largura da ZTA é 50% menor em soldas subaquáticas molhadas que nas soldas feitas ao ar. Martensita e outras estruturas frágeis formadas na região do grão grosseiro da ZTA são encontradas e são muito duras, com ductilidade limitada e muito mais suscetíveis a dano por hidrogênio. O pico de dureza da ZTA é controlado pela temperabilidade do metal base. O método mais comum para classificar a temperabilidade de um material é o carbono equivalente (CE).

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad \text{EQ. 1}$$

É amplamente aceito que altos valores de CE favorecem o endurecimento.

A influência da profundidade (pressão de água) de realização da soldagem subaquática molhada nos teores de oxigênio e de manganês do metal de solda, obtido com eletrodo revestido rutilico, é que o teor de manganês cai abruptamente enquanto o teor de oxigênio do metal de solda aumenta bruscamente (IBARRA, GRUBBS, & OLSON, The Nature of Reactions in Underwater Welding, 1987). Como a composição química do metal de solda obtido na soldagem subaquática molhada com eletrodo revestido rutilico é influenciada pela pressão da água, a microestrutura desse metal de solda, e conseqüentemente suas propriedades mecânicas, também é afetada pela profundidade de soldagem. A microestrutura porém só varia se a profundidade de soldagem for menor que 15 m, conforme mostra a Figura 2.6. (IBARRA, 1988).



**Figura 2.6. Variação da quantidade de constituintes microestruturais do metal de solda em função da profundidade de soldagem na água. (IBARRA, 1987)**

Mesmo sabendo que existem taxas de resfriamento muito altas na soldagem subaquática molhada, não é possível prever com precisão a microestrutura nem o pico de dureza. Outros fatores têm um impacto direto na dureza. A entrada de calor de uma solda é controlada pela energia do arco e velocidade de solda sendo que maior calor de entrada, como eletrodos compridos, cordões de solda mais amplos e menor velocidade de solda, tende a produzir menor dureza no metal de solda e ZTA devido a velocidades de resfriamento mais lentas (BROWN & MASUBUCHI., 1975). Além disso, o efeito do aumento da energia do arco não afeta a taxa de resfriamento para chapas finas como acontece com chapas espessas (TSAI, 1979). A taxa de resfriamento e dureza pode ser diminuída significativamente pela aplicação de pré-aquecimento no cordão de solda mas isso significa mais equipamento, tempo e custo (SZELOGAWSKI, 1992).

## 2.5. Dano por hidrogênio

Soldagem subaquática molhada tem experimentado resultados mistos em relação a trincas induzidas por hidrogênio. A literatura contém reportes de trincas por hidrogênio em metal base e ZTA em aços com baixo carbono equivalente quando são usados eletrodos ferríticos, no entanto, há um grande número de relatórios assim como experiências práticas que concluem que a maioria dos aços estruturais podem ser soldados com eletrodos ferríticos (GOOCH, 1983). O eletrodo E6013 tem sido amplamente usado na soldagem subaquática molhada com resultados muito bons. Têm sido obtidas soldas subaquáticas molhadas feitas com eletrodo E6013, com fase ferrítica livre de fissura (LANDES, 1977) enquanto trabalhos mais recentes (BRACARENSE,

2010) mostram que a quantidade de Hidrogênio difusível dos eletrodos rútilicos produzem muitos mais trincas no metal de solda ou ZTA.

A fonte de hidrogênio é a ebulição e dissociação da água no arco elétrico. Pesquisas relatam sobre a dinâmica das bolhas no arco e transferência do calor em soldagem subaquática molhada (TSAI, 1977). A bolha é formada pela dissociação da água em hidrogênio e oxigênio mais os gases do fluxo do eletrodo. DADIAN (1972) reportou que a bolha contém 70% hidrogênio, 1% oxigênio, 27 % CO<sub>2</sub>/CO e tem sido estimado (BROWN, 1972) que 90% da coluna do arco é hidrogênio.

Essa abundância de hidrogênio é disponibilizada para a poça de fusão, dilui no metal de solda e difunde para ZTA. Após a solidificação, o hidrogênio pode se manifestar como porosidade ou fissuras no metal de solda. A fissura pode acontecer quando uma quantidade suficiente de hidrogênio difusível está presente em uma microestrutura sensível e com tensões. A temperabilidade (CE) deste metal de base e a taxa de resfriamento têm uma relação direta com a susceptibilidade à fissuração.

## 2.6. Porosidade na solda subaquática molhada

Os principais problemas que ocorrem na soldagem subaquática molhada se devem à dissociação da molécula de água em oxigênio e hidrogênio no arco elétrico. Esses elementos químicos (O<sup>-</sup> e H<sup>+</sup>) dissociados se dissolvem no metal líquido após a sua transferência da ponta do eletrodo para a poça de fusão, prejudicando a qualidade da junta soldada por formarem poros e inclusões não metálicas (óxidos), bem como por oxidarem os elementos de liga e modificarem a microestrutura do metal de solda.

Os principais fatores que afetam a porosidade no metal de solda são a profundidade do local de solda, tipo de revestimento do eletrodo, polaridade da corrente de solda, modo de transferência do metal e estabilidade do arco elétrico.

Porosidade é encontrada no metal de solda quando a pressão da água é maior que 0,5 kgf/cm<sup>2</sup>. Porosidade aumenta com o incremento da profundidade. Isto é representado na Figura 2.7 (SUGA, 1986).

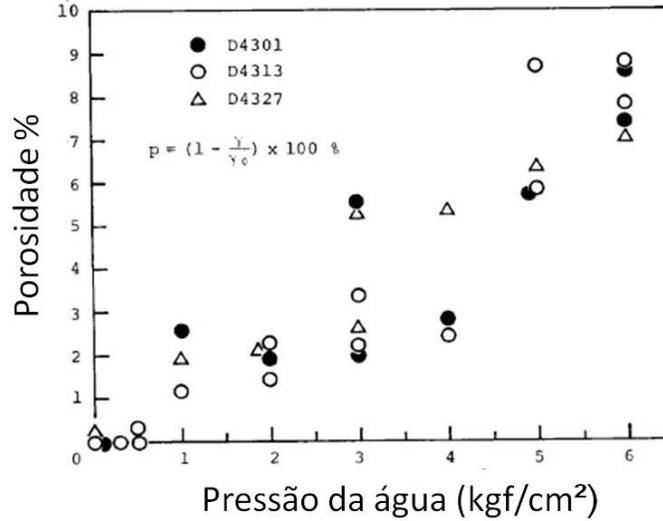


Figura 2.7. Efeito da pressão na porosidade (SUGA, 1986)

A natureza e a quantidade de poros presente no metal de solda envolvem no mínimo quatro processos competitivos dependentes do tempo, tais como, nucleação crescimento, transporte e coalescência dos poros. Assim, as distintas configurações dos poros vão depender do tempo de solidificação do metal fundido (TREVISAN, 1990).

O modo de transferência de calor na soldagem subaquática molhada é muito diferente que o da soldagem ao ar. A existência de bolhas dinâmicas durante a soldagem subaquática induz um fluxo em torno do arco. Este fluxo de água junto com a agitação das bolhas remove rapidamente o calor do metal base e produz o fenômeno de rápido resfriamento (TSAI C. L., 1979). Quer dizer que o resfriamento e a solidificação em soldagem subaquática são muito mais rápidos do que as soldas feitas fora da água, impedindo que as bolhas se escapem do metal de solda pela ação da força de empuxo. Desta forma, essas bolhas ficam retidas no metal solidificado formando os poros (WATSON, 1994)

Para a formação e crescimento de uma bolha dentro do metal líquido a pressão de gás no interior do poro ( $P_{gas}$ ) deve ultrapassar a pressão externa  $P_{ext}$ , ou seja,  $P_{gas} \gg P_{ext}$ . A pressão externa está constituída pelos seguintes parâmetros (PROBST, 2002):

$$P_{ext} = P_{hid} + h_1\rho_1 + h_2\rho_2 + 2\sigma/r \quad \text{EQ. 2}$$

Onde  $P_{hid}$  é a pressão hidrostática da coluna de água ( $50 \text{ m} \approx 5 \text{ atm}$ ),  $h_1$  altura da coluna do metal sobre a bolha ( $h_2$ ), altura da capa da escória sobre a bolha,  $\rho_1$  e  $\rho_2$  densidade do metal líquido e da escória,  $\sigma$  tensão superficial resultante nas interfaces de gás/metal e

líquido/sólido e o raio da bolha. Devido a pequena influência das pressões estáticas no metal e escória, estas podem ser descartadas ficando (ANDO, 1983):

$$P_{\text{gas}} > P_{\text{hid}} + 2\sigma/r \quad \text{EQ. 3}$$

Nesta fórmula, se observa que o crescimento da tensão superficial  $\sigma$  e a diminuição do raio da bolha  $r$  incrementa o valor do parâmetro  $2\sigma/r$  (pressão capilar) (PUCHOL, 2009)

Suga e Hasui (SUGA, 1986) detectaram que com CDEN e usando eletrodo rutilico, ao variar da pressão da coluna de água sobre o arco elétrico, a forma do poro pode ser quase circular ou alongada. Esses autores dividiram os poros, segundo sua forma em poro tipo A e poro tipo B. O poro tipo A no metal de solda é obtido em pressões entre 0,5 e 3 kgf/cm<sup>2</sup> debaixo da água e são causados pelo hidrogênio concentrado na frente de solidificação. O poro tipo B é obtido no metal de solda em pressões entre 3 e 6 kgf/cm<sup>2</sup> debaixo da água, onde é possível observar linhas especiais de solidificação ao redor dos poros. A forma alongada do poro é produzida por uma bolha formada no metal fundido, o qual é atrapalhada pelas sucessivas frentes de solidificação.

Estes tipos de poros são mostrados na Figura 2.8 os quais foram obtidos de cortes longitudinais do cordão de solda feito a diferentes profundidades.

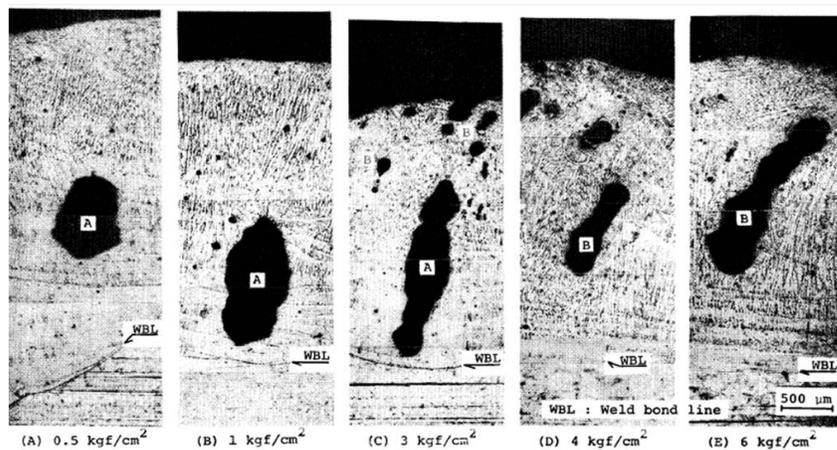


Figura 2.8. Efeito da pressão de água na forma do cordão (SUGA, 1986).

Além da pesquisa mencionada acima, Pessoa (2007) também realizou medições transversais sobre cordões individuais de solda sobre chapa com diferentes tipos de eletrodos e diferentes chapas e concluiu que o aquecimento do eletrodo, por causa do efeito Joule, promove a redução da porosidade ao longo do cordão de soldas molhadas

(cordões sobre chapa) de modo significativo. No entanto, a diferença de profundidades influencia na quantidade de porosidade. A 100 metros de profundidade a redução da porosidade foi maior que a 50 metros como pode se observar na Figura 2.9 e Figura 2.10.

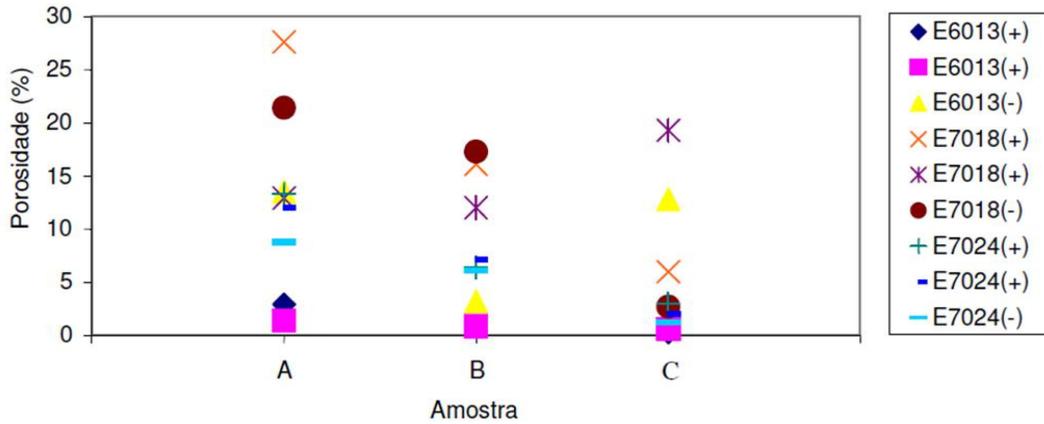


Figura 2.9 Variação da porosidade ao longo do cordão de solda para soldas feitas em aço A-36 a 50 m. (PESSOA, 2007).

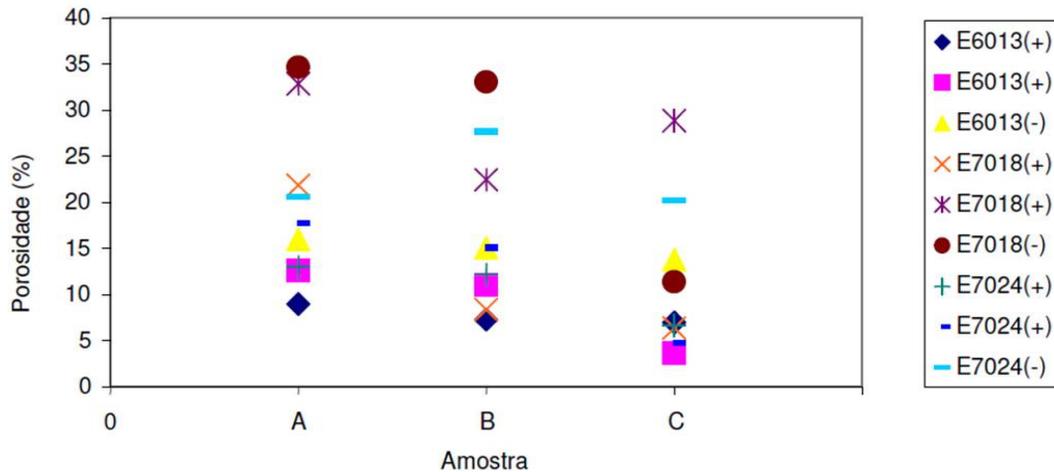


Figura 2.10 Variação da porosidade ao longo do cordão de solda para soldas feitas em aço A-36 a 100 m. (PESSOA, 2007).

PESSOA (2007) não observou influência significativa da polaridade ou do tipo de aço sobre a porosidade ao longo do cordão de solda.

Referente a composição química dos poros, os principais gases formadores dos poros no metal de solda subaquática são hidrogênio, monóxido de carbono e dióxido de carbono (LIU, 1994). Mas, nesta pesquisa, o autor explica que o motivo pelo qual aconteceu a diminuição de porosidade é pelo aumento do tamanho das gotas que faz com que ocorra uma redução na dissolução dos gases  $H_2$  e  $O_2$  no metal fundido. A

redução da dissolução ocorre devido à diminuição da área de contato entre o metal líquido e os gases presentes no arco elétrico.

Pessoa (2007) também pesquisou sobre a variação de porosidade em multipasses de soldas subaquáticas em chanfro descobrindo que as partes finais das soldas apresentam uma menor quantidade de porosidade e melhores propriedades mecânicas. Ele também relatou que a porosidade além de variar com a profundidade, também depende do tipo de revestimento do eletrodo. Neste estudo o eletrodo rutilico produziu soldas com menor porosidade que o eletrodo básico. A diferença deste trabalho com o feito somente com cordões sobre chapa é que a transferência de tipo curto circuito implica em maior tempo de exposição da gota metálica a atmosfera do arco elétrico e, conseqüentemente, maior queima de carbono e geração de CO, explicando assim o aumento do teor de carbono no metal de solda no final do cordão, exatamente onde se detectou menor porosidade e menor ocorrência de curtos circuitos.

Perez (2007) propôs que a maior parte dos gases responsáveis pela formação dos poros em soldagem molhada são formados na gota de metal líquida na ponta do eletrodo revestido durante o processo de transferência metálica. Perez (2007) mostrou que para teores de carbono da alma de 0,05 %, a oxidação de somente 20% do carbono contido nas gotas de 0,5 a 5 mm de diâmetro é suficiente para produzir bolhas de gás CO com um volume duas vezes maior que o volume das gotas.

Vários pesquisadores (OLSON D. L., 1994) (SUGA, 1986) (SILVA W. C., 2009) (MILLS, 1990) têm aportado dados sobre a composição química dos poros. Estes valores são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Composição química de poros em soldas molhadas.

Composição química do gás vol. Pct	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	Outros
Suga & Hasui	96	0,4	0,06	--
Silva	62-82	11 - 24	4 - 6	--
Gooch	45	8	4	4
Liu & Olson	20-30	70 - 80	--	--

Baseando nestes valores da composição química dos poros, Andrade (2010) verificou a influência do teor de carbono da alma do eletrodo e do metal base na porosidade do metal de solda. Para isso mediu a porosidade produzida com eletrodos E6013 de 4 mm com duas composições químicas na alma. Uma com baixo teor de C

(0,002 %) e outro com maior (0,01 %). As soldas foram feitas em dois tipos de chapas: Uma com 0,10 % de C e outras com 0,66 % de C.

Andrade (2010) concluiu que o eletrodo com maior teor de carbono produz soldas com maior porosidade. Isso relacionado com a maior quantidade de curtos circuitos na transferência metálica e oxidação do carbono na gota. O metal de base com maior teor de carbono produziu soldas com menor porosidade. Isso foi relacionado com o menor reforço e penetração apresentado pelos cordões de solda nesta condição.

Referente a configuração do poro (largura, reforço e penetração), Pessoa (2007) pesquisou sobre a localização dos poros em soldas subaquáticas molhadas procurando encontrar os valores ótimos de corrente para atingir a melhor localização dos poros, já que é melhor ter os poros o mais perto ao topo do cordão pois fica mais fácil removê-los por técnica de refusão ou por desbaste.

Para descobrir os valores ótimos, Pessoa (2007) usou eletrodos E7018, E7024 e E6013 e realizou as soldas sobre chapa de aço ASTM-A36 a profundidade de 50 e 100 m. As soldas deste experimento mostraram que o eletrodo E7018 produz mais poros no reforço que na penetração. Além desta descoberta, observou que a profundidade não afeta significativamente a posição dos poros. Ao mesmo tempo observou que o eletrodo E6013 produz melhores soldas a baixa profundidade.

Com estes resultados, o autor propôs o estudo da técnica refusão para remover porosidade presente em cordões anteriores. Para isso usou CDEP e CDEN a profundidades de 50 e 100 m em chapas de aço A-36, A-572 e API 5L. Nestes multipasses aconteceu que os cordões com polaridade CDEP apresentaram maior largura, pouco reforço e penetração superficial. Também se observou que CDEP produz menos porosidade que o uso de polaridade CDEN.

A maior descoberta deste trabalho foi que o uso de CDEP, e corroborando com os resultados obtidos em soldas sobre chapa feitas por Pessoa (2007), é que os poros localizados no topo do reforço podem ser reduzidos em sua totalidade com uma boa metodologia de multipasses.

## 2.7. Medição de porosidade

Porosidade em soldagem é resultado de gases dissolvidos ou gases liberados durante o processo de soldagem, sendo preso no metal quando não há tempo suficiente para escapar antes da solidificação. Se na forma de buracos redondos, o gás é

simplesmente chamado porosidade. No entanto, se a forma é alongada são chamados porosidade vermicular.

O efeito da porosidade sobre a resistência da solda é um tema muito debatido. Recentes critérios de aceitação como API 1104 e outros permite o tratamento da porosidade como um defeito planar. Isso também é um tratamento muito conservador do tipo de defeito, mas fornece um método prático de aceitar algum tipo de quantificação (API, 1999). E é por isso que é importante a quantificação da porosidade.

#### *2.7.1 – Método Estatístico Pontual (MAZZAFERRO, 1998).*

Nesse método utiliza-se uma malha com pontos igualmente espaçados, colocados sobre a imagem da seção transversal do cordão de solda, gerada através de um projetor de perfis, para dimensionar e quantificar os poros.

A porosidade é resultado da proporção entre a área total dos poros e a área do cordão de solda.

#### *2.7.2 – Gravimetria (MORAIS & FERRARESI, 2001).*

No método destrutivo gravimétrico o grau de porosidade é estimado pela medida da densidade do cordão de solda. A variável dependente associada à porosidade do cordão é o percentual de volume de vazios do cordão, determinado pela variação da densidade.

Na realização do ensaio destrutivo por gravimetria, seguem-se os seguintes passos:

1. Uma amostra representativa de cordão de solda (zona fundida) é separada do corpo de prova soldado, pela remoção cuidadosa do metal de base
2. A amostra, composta somente da zona fundida do cordão de solda é pesada, primeiro ao ar [ $P_{ar}$ ] e em seguida em água destilada [ $P_{ag}$ ].
3. Calcula-se o Empuxo [ $E$ ], que é responsável pela diferença entre os pesos da amostra ao ar [ $P_{ar}$ ] e em água [ $P_{ag}$ ], dado por  $E = P_{ar} - P_{ag}$
4. Com o valor de  $E$ , calcula-se o volume de líquido deslocado pela amostra [ $V_{ld}$ ], que equivale ao próprio volume da amostra [ $V_{am}$ ], dado por:

$$V_{id} = V_{am} = \frac{E}{\rho_{H_2O} * g} \quad \text{EQ. 4}$$

onde  $\rho_{H_2O}$  é a densidade da água, igual a  $1 \text{ kg/dm}^3$ , e  $g$  é a aceleração da gravidade ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ).

5. Com o volume da amostra [ $V_{am}$ ] e o peso da amostra ao ar [ $P_{ar}$ ], determina-se a densidade real da amostra [ $\rho_{am}$ ], em [ $\text{kg/m}^3$ ]:

$$\rho_{am} = \frac{P_{ar}}{V_{am}} \quad \text{EQ. 5}$$

6. Para determinação do volume de vazios da amostra, adota-se um valor de densidade de referência, equivalente à gravidade específica de uma amostra considerada perfeita [ $\rho_{amperf}$ ] ou sem poros e que possui 50% de diluição.

Esse valor é obtido com determinação, pelo mesmo método, de valores de densidade do metal de base e do arame eletrodo.

7. Finalmente, com os valores das densidades de referência [ $\rho_{amperf}$ ] e real [ $\rho_{am}$ ] da amostra, determina-se o percentual de volume de vazios, dado por:

$$V_v = \frac{\rho_{amperf} - \rho_{am}}{\rho_{amperf}} \times 100 \quad \text{EQ. 6}$$

Pelo método gravimétrico, citado acima, estima-se o volume de vazios através da medida de densidade da amostra, não determinando a localização, distribuição e tamanhos desses vazios.

Saperstein (1964) apud Morais e Ferraresi (2001) cita que a precisão desse método, medida em laboratório, é de aproximadamente 0,3%.

### 2.7.3 - Macrográfico (análise de imagens) (SANCHES-OSIO et al, 1993).

Esse método faz uso de ferramentas computacionais capazes de quantificar, medir e localizar os vazios na área estudada. Para o ensaio destrutivo de medição da porosidade no metal de solda, seguem-se os seguintes passos:

1. Fotografa-se a seção transversal da amostra de solda polida em duas condições:

Com ataque: permite a visualização da seção transversal do cordão de solda;

Sem ataque: permite a visualização da área da seção transversal dos poros.

2. As imagens são tratadas (binarização) e um software especial quantifica, mede e localiza os poros no metal de solda.

A precisão do método depende da preparação da amostra, resolução da imagem, calibração do software e habilidade do operador do software na identificação das bordas dos poros.

Esse método permite a medição da porosidade localizada bem como a quantificação e determinação da posição dos poros.

#### *2.7.4 - Método Radiográfico*

Para ensaio não destrutivo de medição da porosidade no metal de solda seguem-se os mesmos passos adotados no ensaio destrutivo, sendo que, ao invés de seccionar o cordão para obtenção de imagens da seção transversal do mesmo, faz-se radiografias do cordão de solda.

Essas imagens são tratadas e, através do uso de um software, os poros são medidos, contados e localizados.

Esse método permite a medição da porosidade no volume do cordão, apresentando problemas quando os poros estão em um mesmo plano paralelo à direção de incidência dos raios X (LORENZO et al, 2005).

A norma frequentemente utilizada em soldagem subaquática é a ANSI/AWS D3.6M (1999) que classifica as soldas por tipos ou classes. Normalmente as soldas subaquáticas molhadas são classificadas como classe B, que podem ser aplicadas em situações menos críticas (baixa responsabilidade) onde menor ductilidade e maior porosidade são toleradas. Aplicações típicas incluem jaquetas em estruturas offshore (METALS HANDBOOK, 1986).

O item 8.10.1 da norma ANSI/AWS D3.6M:1999 estabelece como critério de aceitação para testes com radiografias em soldas subaquáticas molhadas de classe B:

- Poros com diâmetro superior a 5 mm não são permitidos;

- Poros de diâmetro entre 5 e 1,6 mm são restritos a um número máximo de 7 dentro de um comprimento de 25,4 mm do cordão de solda, por 25,4 mm de espessura da chapa;
- Para poros com diâmetro inferior a 1,6 mm, não existe restrição.

O item 8.10.2 da mesma norma estabelece como critério de aceitação para testes com macrografias, para soldas da classe B:

- A área dos poros não pode superar a 5,0 % da área de solda;
- A maior dimensão das descontinuidades não pode superar 2,0 mm.

## CAPÍTULO 3 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 3.1. Materiais

#### 3.1.1 - Corpo de prova.

Utilizou-se o aço ASTM A-36 (tipo de aço normalmente aplicado em plataformas marítimas) com limite de escoamento de 250 MPa e limite máximo de resistência de 400-550 MPa.

A composição química do aço ASTM A-36 utilizado neste trabalho está mostrada na Tabela 3.1. A equação um foi utilizada para obter o valor de carbono equivalente das duas chapas de aço A-36 de onde foram extraídos os corpos de prova. O valor de CE foi de 0,29, o que representa uma excelente soldabilidade (Ginzburg, 2000).

Tabela 3.1. Composição química das chapas utilizado nos testes

		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Nb	Al	W	V	Ti	Fe%
Chapa 1	N1	0,202	0,151	0,583	0,012	0,01	0,017	0,017	0,002	0,002	0	0,057	0	0,005	0,003	98,94
	N2	0,182	0,149	0,587	0,012	0,01	0,016	0,016	0,003	0,006	0	0,059	0	0,006	0,003	98,95
	Ave.	0,192	0,15	0,585	0,012	0,01	0,017	0,017	0,003	0,004	0	0,058	0	0,006	0,003	98,95
Chapa 2		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Nb	Al	W	V	Ti	Fe%
	N1	0,183	0,15	0,6	0,012	0,01	0,016	0,016	0,003	0,008	0,001	0,059	0	0,006	0,003	98,93
	N2	0,194	0,152	0,603	0,013	0,01	0,017	0,017	0,003	0,007	0,001	0,06	0	0,006	0,003	98,91
Ave.	0,189	0,151	0,602	0,013	0,01	0,017	0,017	0,003	0,008	0,001	0,06	0	0,006	0,003	98,92	

Os corpos de prova para deposição sobre chapa foram cortados de uma chapa de 10 mm de espessura. O tamanho das chapas de teste foi 300 mm de comprimento e 90 mm de largura conforme a Figura 3.1.

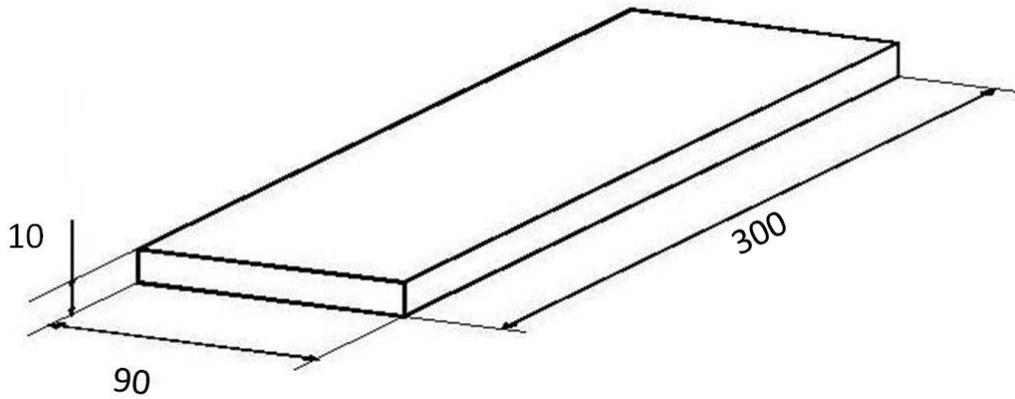


Figura 3.1. Corpo de prova para soldagem sobre chapa, cotas em mm.

### 3.1.2 – Consumível

Foram utilizados eletrodos revestidos comerciais E6013, com alma de 3,2 mm de diâmetro. Os eletrodos foram cortados a partir de 355 mm com vários comprimentos por causa das configurações de ângulos de chapa e ângulo de trabalho. Os eletrodos foram protegidos com verniz vinílico para que o revestimento não molhasse durante a soldagem.

## 3.2. Equipamentos Utilizados

### 3.2.1 – Câmara para soldagem Hiperbárica

Para simulação das operações de soldagem molhada nas profundidades de 10 e 50 m foi utilizada uma câmara hiperbárica localizada no Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação (LRSS) da Universidade Federal de Minas Gerais, que permite operar com pressões de trabalho de até 20 atm. A Figura 3.2 é uma fotografia da câmara utilizada.



**Figura 3.2. Fotografia da câmara para soldagem hiperbárica.**

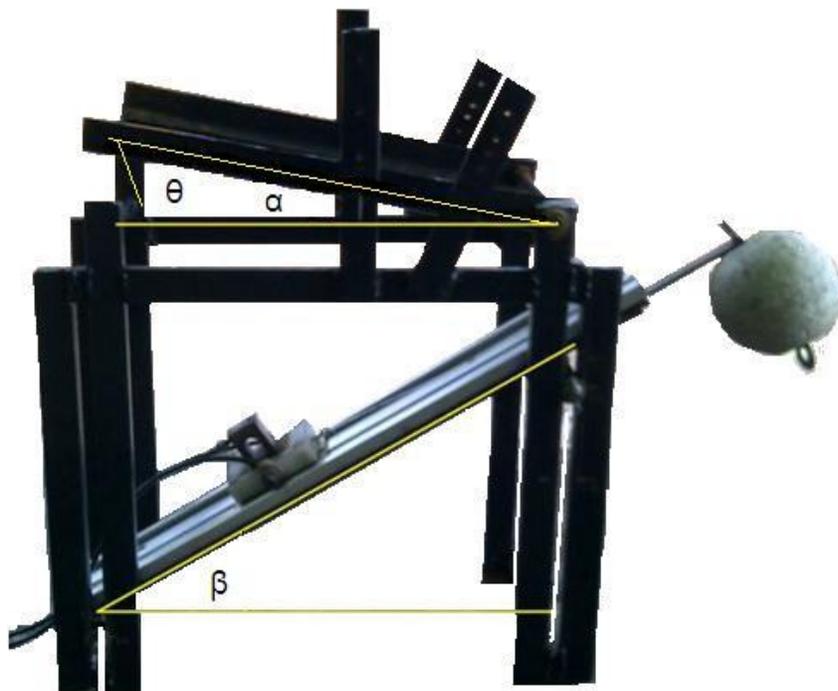
Para produção de soldas utilizando a câmara hiperbárica, realiza-se a seguinte sequência de operações:

1. Posicionamento do eletrodo e a chapa no mecanismo de soldagem;
2. Posicionamento do mecanismo de abertura do arco elétrico;
3. Fechamento da tampa do vaso;
4. Enchimento do tanque com água por meio do acionamento de uma bomba;
5. Pressurização da câmara com ar comprimido na pressão desejada;
6. Seleção dos parâmetros de soldagem na máquina de solda;
7. Acionamento da fonte de soldagem para abertura do arco e realização da solda;
8. Ao final da soldagem desconectam-se os cabos e desliga-se a máquina de soldagem;
9. Despressuriza-se a câmara retirando-se o ar comprimido;
10. Esvazia-se o vaso utilizando-se a bomba para enviar a água de volta ao reservatório;
11. Reposiciona-se o mecanismo de soldagem retirando-se a parte restante do eletrodo;
12. Remove-se a placa de aço com o cordão de solda para limpeza e análises.

### 3.2.2 – Dispositivo de soldagem por Gravidade com Eletrodos Revestidos

As soldas foram realizadas através de um dispositivo mecanizado para soldagem com eletrodos revestidos construído especialmente para esta aplicação, mostrado na Figura 3.3. Esse dispositivo tem as seguintes características:

- Permite o uso de eletrodos com diâmetro de 3,2 mm.
- Velocidade de soldagem variável em função da taxa de fusão do eletrodo e da abertura do ângulo de chapa ( $\alpha$ ) mostrado na Figura 3.4.
- Permite a regulagem do ângulo de trabalho ( $\theta$ ) do eletrodo.
- Pelo fato de ser um mecanismo que utiliza a gravidade com controle da deposição, esse dispositivo apresenta boa repetibilidade. Uma vez fixados o ângulo de chapa ( $\alpha$ ), ângulo de guia ( $\beta$ ) e ângulo de trabalho ( $\theta$ ), juntamente com a taxa de fusão, é possível fazer cordões de solda com grande semelhança quantas vezes for necessário.
- Para cada configuração dos ângulos  $\alpha$  e  $\beta$  existem valores ótimos de taxa de fusão que permitem o equilíbrio entre as velocidades de soldagem e de mergulho do eletrodo de modo que se tenha um comprimento de arco praticamente constante.



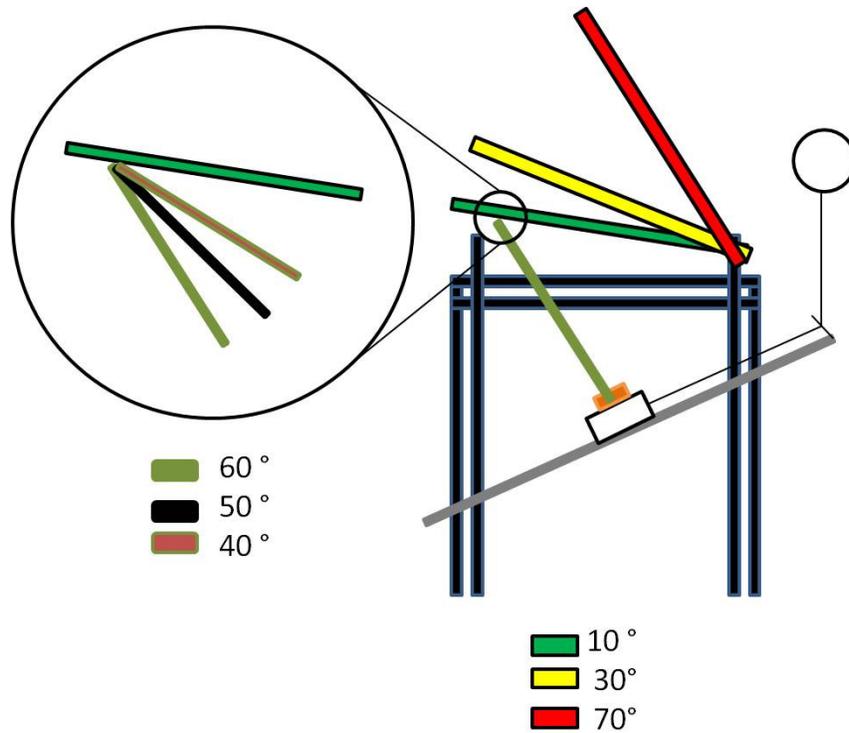


Figura 3.3. a) Dispositivo de soldagem por gravidade – flotabilidade. b) Esquema ilustrativo de ângulos de chapa  $\alpha$  e ângulos de trabalho  $\theta$  dispositivo de soldagem.

### 3.2.3 – Fonte de soldagem

A fonte de soldagem conta com um sistema automático de regulação eletrônica de corrente, corrente máxima 180 A e tensão em vazio 60 V.

### 3.2.4 – Serra de fita Horizontal – Vertical

Na serra foram cortadas as chapas soldadas em 3 partes; Início, meio e fim tal como ilustra a figura 3.4.

### 3.2.5 – Cortadora de disco

A cortadora de disco foi usada para cortar os pedaços da chapa previamente cortados com a serra fita. O objetivo é obter as amostras de solda para colocar na embutidora.

### 3.2.6 – Embutidora

Neste equipamento foram embutidas as 162 amostras analisadas.

### 3.2.7 – *Politriz*

Foram polidas as 162 amostras pelo menos até lixa 600 para permitir visualizar a penetração e reforço do cordão.

### 3.2.8 - *Microscópio e Macroscópio*

As microestruturas foram obtidas e analisadas em Microscópio Olympus BX60M com aumentos de 50X. A distribuição dos poros assim como forma do cordão foram obtidas e analisadas em Macroscópio Olympus SZ60. O software usado para digitalizar as imagens foi o Image ++

### 3.2.5 – *Software*

Foi usado o software Quantikov para medir as dimensões do cordão assim como a porosidade.

## 3.3. Procedimento experimental

Os valores de corrente e o ângulo de soldagem foram selecionados em testes preliminares. Esses foram realizados com o objetivo de encontrar os melhores parâmetros de soldagem tendo como base a aparência do cordão de solda e porosidade. As soldas foram feitas em profundidades simuladas de 10 e 50 metros utilizando os valores de corrente mostrados na tabela 3.2 com ângulos de chapa ( $\alpha$ ) de 10°, 30° e 70° e ângulos de trabalho ( $\theta$ ) de 40°, 50° e 60°.

Para cada condição (ângulos de chapa, ângulos de trabalho e profundidade) foram feitos três cordões sobre chapa com polaridade negativa (CDEN).

Todos os cordões foram cortados em três pontos diferentes, a 20 mm do início, no meio e a 20 mm do final, como mostrado na Figura 3.4. As amostras produzidas foram utilizadas para obtenção de imagens para produção de macrografias (medição de largura, reforço e penetração) assim como para medição de porosidade.

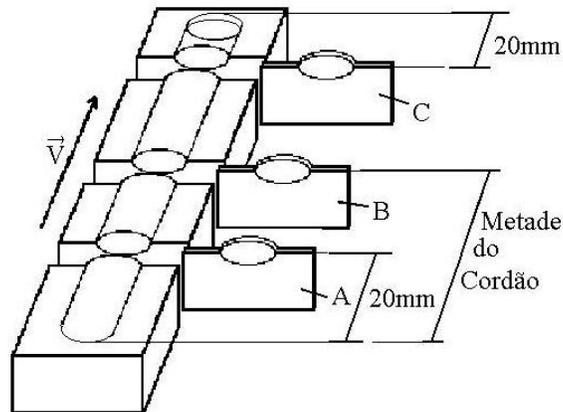


Figura 3.4. Metodologia para retirada das amostras nos testes de deposição sobre chapa.

Nas Tabelas 3.2 e 3.3 são apresentados os parâmetros de corrente usados nas profundidades de 10 e 50 m.

Tabela 3.2. Parâmetros de correntes aplicadas para os testes a 10 m.

Código	$\alpha$	$\theta$	$\beta$	Cordão	IAV (A)	TM (ms)	VCC (V)	ICC	Corrente (A)	Tensão (V)	Tempo (s)	Comprimento (mm)	Vel (mm/s)
1.1	10°	40°	40°	1	450	99,9	18	370	100	22	39,47	184	4,66
				2	450	99,9	18	370	100	22	39,76	185	4,65
				3	450	99,9	18	370	100	23	37,13	177	4,77
2.1	10°	50°	30°	1	450	99,9	18	370	100	20	45,17	225	4,98
				2	450	99,9	18	370	100	22	43,59	226	5,18
				3	450	99,9	18	370	100	23	44,35	224	5,05
3.1	10°	60°	20°	1	400	99,9	18	115	85	23	46,26	210	4,54
				2	400	99,9	18	115	85	22	47,8	210	4,39
				3	400	99,9	18	115	85	22	50	193	3,86
4.1	30°	40°	20°	1	450	99,9	18	370	100	22	49,35	217	4,40
				2	400	99,9	18	120	95	22	49,57	216	4,36
				3	450	99,9	18	370	100	22	49,79	220	4,42
5.1	30°	50°	10°	1	400	99,9	18	130	90	23	52,7	230	4,36
				2	400	99,9	18	130	90	23	53,1	223	4,20
				3	400	99,9	20	130	95	23	51	233	4,57
6.1	30°	60°	0°	1	450	99,9	18	135	95	22	41	235	5,73
				2	450	99,9	18	200	100	23	41	238	5,80
				3	450	99,9	18	200	100	23	42	233	5,55
7.1	70°	40°	-20°	1	450	99,9	18	200	100	22	36	183	5,08
				2	450	99,9	18	200	100	21	37	188	5,08
				3	450	99,9	18	200	100	21	32	200	6,25
8.1	70°	50°	-30°	1	450	99,9	18	300	100	22	22	145	6,59
				2	450	99,9	18	300	100	22	23	152	6,61
				3	450	99,9	18	300	100	23	23	156	6,78
9.1	70°	60°	-40°	1	450	99,9	18	300	100	23	16,2	134	8,27
				2	450	99,9	18	300	100	25	16,31	130	7,97
				3	450	99,9	18	300	100	24	16	126	7,88

IAV(A) Corrente de habilitação, TM Tempo de manutenção do IAV(A), VCC(V) Tensão curto circuito, ICC Corrente Curto Circuito

Tabela 3.3. Parâmetros de corrente aplicados para os testes a 50 m.

Código	$\alpha$	$\theta$	$\beta$	Cordão	IAV (A)	TM (ms)	VCC (V)	ICC	Corrente (A)	Tensão (V)	Tempo (s)	Comprimento (mm)	Vel (mm/s)
1.5	10°	40°	40°	1	450	99,9	18	370	120	21	37,77	183	4,85
				2	450	99,9	18	370	120	21	41,25	186	4,51
				3	450	99,9	18	370	120	22	41,41	188	4,54
2.5	10°	50°	30°	1	450	99,9	18	370	120	23	46,14	223	4,83
				2	450	99,9	18	370	120	21	46,52	228	4,90
				3	450	99,9	18	370	120	21	43,11	225	5,22
3.5	10°	60°	20°	1	450	99,9	18	370	120	21	38,64	228	5,90
				2	450	99,9	18	370	120	20	37,87	235	6,21
				3	450	99,9	18	370	120	21	34,81	228	6,55
4.5	30°	40°	20°	1	450	99,9	18	370	120	22	47,34	218	4,60
				2	450	99,9	18	370	120	23	48,99	218	4,45
				3	450	99,9	18	370	120	23	49,55	217	4,38
5.5	30°	50°	10°	1	450	99,9	18	370	120	19	39,36	206	5,23
				2	450	99,9	18	370	120	21	41,44	204	4,92
				3	450	99,9	18	370	120	21	37,19	207	5,57
6.5	30°	60°	0°	1	450	99,9	18	370	120	20	25,72	167	6,49
				2	450	99,9	18	370	120	19	30,55	233	7,63
				3	450	99,9	18	370	120	22	38,68	232	6,00
7.5	70°	40°	-20°	1	450	99,9	18	370	120	20	22,23	110	4,95
				2	450	99,9	18	370	120	21	28,54	146	5,12
				3	450	99,9	18	370	120	21	26	147	5,65
8.5	70°	50°	-30°	1	450	99,9	18	370	120	22	23,21	157	6,76
				2	450	99,9	18	370	120	21	22,53	160	7,10
				3	450	99,9	18	370	120	21	23,3	162	6,95
9.5	70°	60°	-40°	1	450	99,9	18	370	120	21	14,24	120	8,43
				2	450	99,9	18	370	120	22	19,18	132	6,88
				3	450	99,9	18	370	120	21	15,47	140	9,05

IAV(A) Corrente de habilitação, TM Tempo de manutenção do IAV(A), VCC(V) Tensão curto circuito, ICC Corrente Curto Circuito

### 3.3.1 – Análise da Geometria do Cordão de Solda

Para a medição da largura, reforço e penetração na seção transversal das soldas foi utilizado o programa de análise de imagens Quantikov.

### 3.3.2 – Análise da Porosidade do metal de solda

Para medição de porosidade foi utilizado o método macrográfico e o programa Quantikov. As amostras foram fotografadas em dois estágios:

- Polidas em lixa de granulação # para obtenção de imagem para contagem e localização e medição da área dos poros.
- Atacadas com nital 2 % para obtenção de imagem para medição da área da seção transversal do cordão de solda.

A porosidade calculada foi o resultado da proporção entre a área dos poros e a área da seção transversal do cordão. Para cada condição testada 9 macrografias foram realizadas.

## CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Inspeção Visual

Essa primeira análise das soldas teve como objetivo fornecer um indicativo de alterações morfológicas no cordão de solda que poderiam ser relacionadas com as variáveis alteradas nos testes (ângulo de chapa  $\alpha$ , ângulo de trabalho  $\theta$  e profundidade). Foram avaliadas as presenças de mordeduras, respingos e trincas superficiais.

Nos cordões de solda realizados na condição ângulo de chapa  $\alpha$  a  $10^\circ$  e diversos ângulos de trabalho feitos a 10 metros de profundidade, a aparência é ótima, já que não apresenta mordeduras, respingos ou porosidade. Na Figura 4.1 são apresentados os cordões.

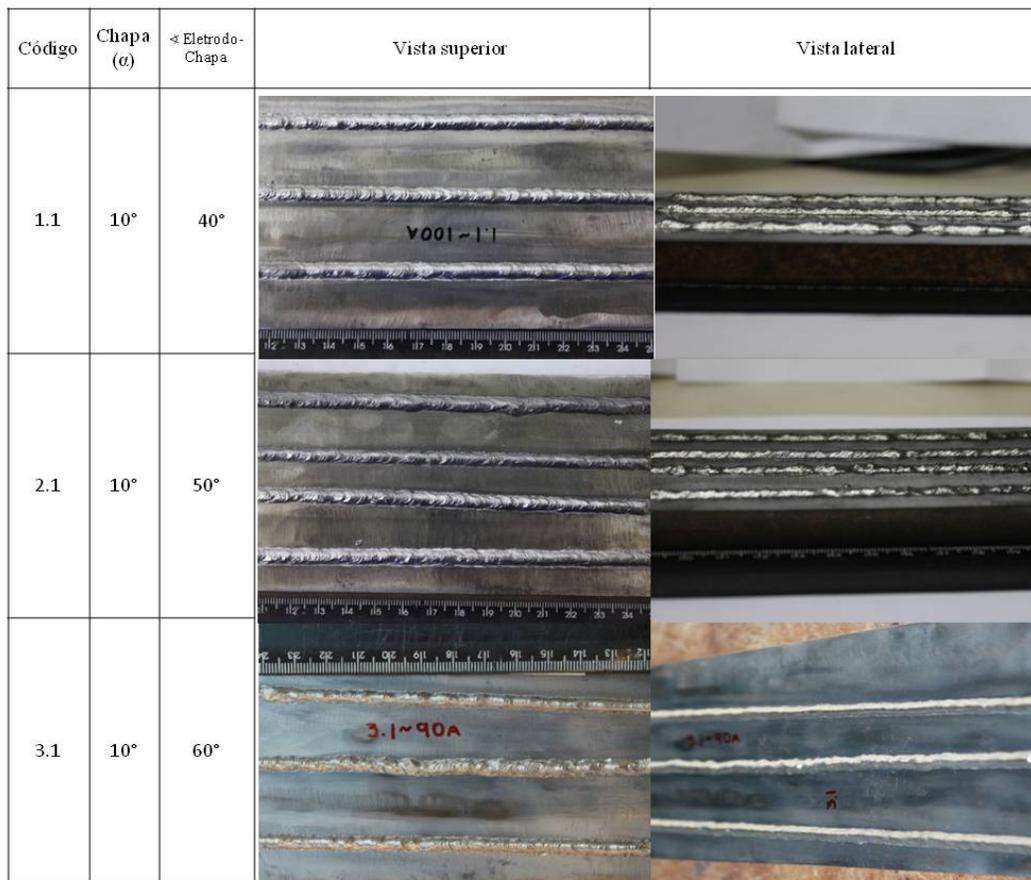


Figura 4.1. Aparência de cordões feitos com ângulo de chapa a  $10^\circ$  e 10 m de profundidade.

Nos cordões de solda realizados na condição ângulo de chapa  $\alpha$  a  $10^\circ$  e diversos ângulos de trabalho feitos a 50 metros de profundidade, a aparência é boa, não apresenta mordeduras, porém alguns respingos e poros localizados no meio do comprimento do cordão são encontrados. Na Figura 4.2 são apresentados os referidos cordões.

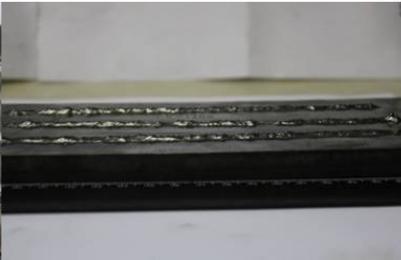
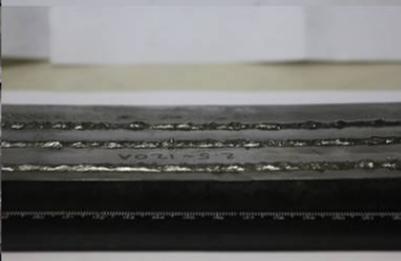
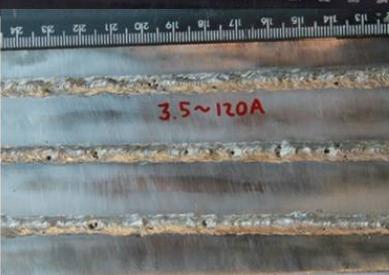
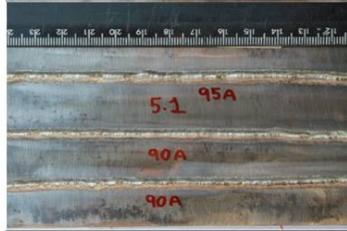
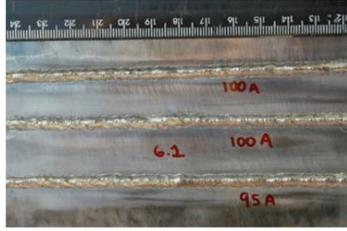
Código	Chapa ( $\alpha$ )	$\leftarrow$ Eletrodo-Chapa	Vista superior	Vista lateral
1.5	$10^\circ$	$40^\circ$		
2.5	$10^\circ$	$50^\circ$		
3.5	$10^\circ$	$60^\circ$		

Figura 4.2. Aparência de cordões feitos com ângulo de chapa a  $10^\circ$  e 50 m de profundidade.

Os cordões de solda realizados na condição ângulo de chapa  $\alpha$  a  $30^\circ$  e diversos ângulos de trabalho feitos a 10 metros de profundidade, a aparência é ótima, não apresenta mordeduras, respingos ou porosidade. Na Figura 4.3 são apresentados os cordões.

Código	Chapa (α)	∠ Eletrodo-Chapa	Vista superior	Vista lateral
4.1	30°	40°		
5.1	30°	50°		
6.1	30°	60°		

**Figura 4.3. Aparência de cordões feitos com ângulo de chapa a 30° e 10 m de profundidade.**

As soldas feitas com o ângulo de chapa a 30° e profundidade de 50 m, têm uma boa aparência já que apenas alguns poros são visíveis nos cordões, e estes não apresentaram mordeduras nem respingos. Isso considerando que a 50 m de profundidade o número de poros é alto.

Referente às soldas feitas com o ângulo de chapa a 70° e profundidade de 10 m, continua-se tendo o mesmo padrão de comportamento que as feitas com ângulo de chapa a 10° e 30°: Ótima aparência, sem mordeduras, sem respingos e sem porosidade visível no cordão. Isso é representado na Figura 4.5

As soldas feitas com o ângulo de chapa a 70° e profundidade 50 m, apresentam, em geral, uma quantidade maior de porosidade que aquelas feitas com 10° e 30°, mas aquelas que foram feitas na condição 9 (ângulo de trabalho a 60°) apresentam a maior parte de porosidade no meio do cordão. Veja a Figura 4.6

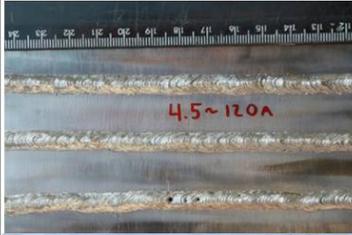
Código	Chapa ( $\alpha$ )	$\angle$ Eletrodo-Chapa	Vista superior	Vista lateral
4.5	30°	40°		
5.5	30°	50°		
6.5	30°	60°		

Figura 4.4. Aparência de cordões feitos com ângulo de chapa a 30° e 50 m de profundidade.

Código	Chapa ( $\alpha$ )	$\angle$ Eletrodo-Chapa	Vista superior	Vista lateral
7.1	70°	40°		
8.1	70°	50°		
9.1	70°	60°		

Figura 4.5. Aparência de cordões feitos com ângulo de chapa a 70° e 10 m de profundidade.

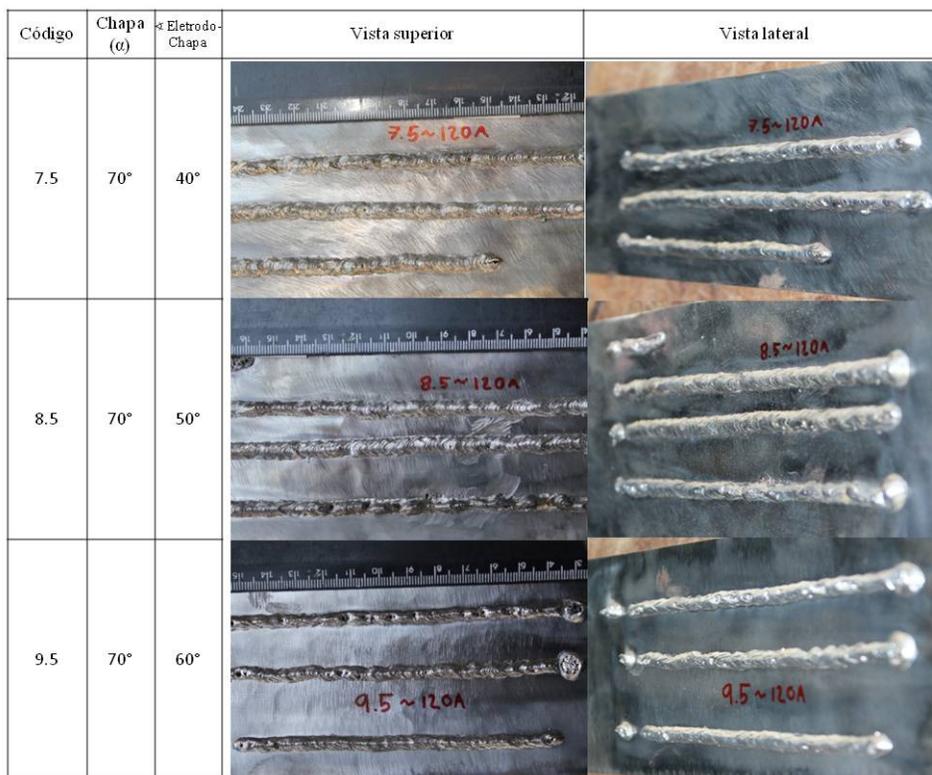


Figura 4.6. Aparência de cordões feitos com ângulo de chapa a 70° e 50 m de profundidade.

Na Tabela 4.1 são apresentadas as quantidades de defeitos obtidos pela análise visual de cada um dos cordões de solda para todas as condições.

Tabela 4.1. Quantidade de defeitos por condição.

	1.1	1.5	2.1	2.5	3.1	3.5	4.1	4.5	5.1	5.5	6.1	6.5	7.1	7.5	8.1	8.5	9.1	9.5
Poros	0	2	0	16	0	47	0	5	0	15	0	15	0	6	0	12	0	30
Trincas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mordeduras	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Respingos	0	0	1	2	0	5	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1
Comp. (cm)	18	19	24	23	21	21	22	22	22	22	23	22	21	17	16	15	12	14

Percebe-se que a porosidade superficial nas soldas feitas a 10 metros em todas as condições não é um problema, o mesmo não ocorre nas feitas a 50 m de profundidade, onde as condições com maior quantidade de poros foram a 3.5, depois a 9.5 e quase com os mesmos valores as 2.5, 5.5, 6.5 e 8.5. As soldas feitas a 50 m com menor quantidade de porosidade foram as das condições 1.5, 4.5 e 7.1.

## 4.2. Geometria do Cordão de solda

A seção transversal do cordão de solda foi retirada seguindo o procedimento mostrado na Figura 3.6, e para macrografia utilizou-se técnica padrão e ataque com reagente Nital a 2 %. Os parâmetros medidos estão mostrados na Figura 4.7. Para cada cordão de solda foram analisadas três seções distintas, sendo que o resultado apresentado foi a média dos valores obtidos. A Tabela 4.2 mostra a média das medidas de largura, reforço e penetração para cada uma das condições de solda.

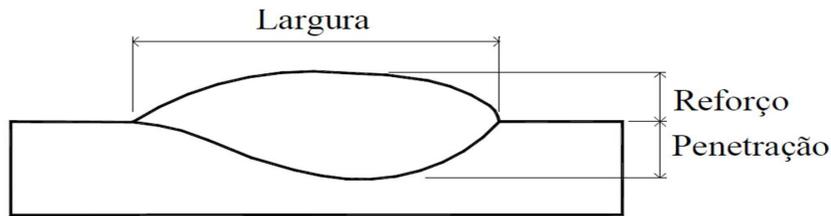


Figura 4.7. Parâmetros medidos no cordão.

Tabela 4.2. Média das medidas de largura, reforço e penetração para cada uma das condições de solda.

Profundidade	Ângulo da chapa	Média da largura (mm)	Profundidade	Ângulo da chapa	Média do reforço (mm)
10 m	10	5,49	10 m	10	1,80
	30	5,24		30	1,80
	70	5,20		70	1,63
50 m	10	7,06	50 m	10	1,57
	30	6,82		30	1,60
	70	6,11		70	1,32

Profundidade	Ângulo da chapa	Média da penetração (mm)	Profundidade	Ângulo da chapa	Média da área (mm <sup>2</sup> )
10 m	10	1,09	10 m	10	9,49
	30	1,05		30	8,77
	70	1,06		70	8,31
50 m	10	1,35	50 m	10	11,70
	30	1,35		30	11,81
	70	1,12		70	9,79

Referente a largura, conforme o ângulo da chapa aumenta de 10° a 70°, a largura diminui em 5% para as soldas feitas a 10 m, o que é um valor muito baixo comparado com o 14% que acontece com as soldas feitas a 50 m de profundidade. Isso representa uma diferença de 9%.

Quanto ao reforço, em ambas profundidades as soldas apresentam um reforço maior nas feitas com um ângulo de chapa de 30°, depois são aquelas feitas com 10° e finalmente aquelas com 70°. A diferença percentual entre o maior e menor reforço na profundidade de 10 m é de 9%, enquanto a diferença a 50 m é de 18%. Uma diferença de 9% igual que a largura.

Nas medições de penetração é visível que nas soldas feitas a 10 m o maior valor é com a chapa a 10°, depois 70° e finalmente as feitas a 30°, onde a diferença entre o valor máximo e mínimo é de 4%, enquanto que a 50 m de profundidade, tal comportamento não é apresentado, sendo que a maior penetração foi com ângulo de chapa 10°, depois 30° e finalmente 70°. A diferença entre a maior e menor penetração é de 17%.

Referente a área total do cordão nas soldas a 10 m, contrário ao que poderia ser pensado, as soldas feitas com chapa a 10°, são aquelas com maior área total, seguidas por 30° e 70° respectivamente. As soldas feitas a 50 m apresentam o mesmo comportamento para o ângulo de chapa 70° já que é a menor área. A diferença percentual entre a de maior e menor área é 17%.

Na Tabela 4.3, apresenta-se a relação da velocidade com os ângulos de chapa e com os valores obtidos nas medições de Largura, Reforço e Penetração.

Pode-se perceber que conforme aumenta-se o ângulo da chapa, ou seja, quanto mais tende a vertical, a velocidade de soldagem é maior, porém a área do cordão é menor assim como a largura média dos cordões. Apesar do aumento da velocidade, não é visível mordedura maior que a permitida pela norma AWS 3.6 para solda classe A, a qual especifica que mordeduras em chapas de espessura maior que 1 polegada não deve exceder 1.5 mm (AWS, 1999).

Tabela 4.3. Média de seções medidas no cordão e média de velocidade por condição.

Prof.	Ângulo Chapa	Largura	Reforço	Penetração	Área (mm <sup>2</sup> )	Corrente (I)	Tensão (V)	Vel. (mm/s)
10 m	10°	5,49	1,80	1,09	9,48	100 A	22,00	4,68
	30°	5,24	1,80	1,04	8,77		22,60	4,82
	70°	5,20	1,63	1,06	8,30		22,53	6,72
50 m	10°	7,06	1,57	1,35	11,70	120 A	21,16	5,28
	30°	6,82	1,60	1,34	11,81		21,10	5,47
	70°	6,11	1,32	1,12	9,79		21,10	6,77

A velocidade também é afetada pela corrente. Nas soldas feitas a 10 m a corrente foi de 100 A, enquanto para 50 m foi de 120 A. Este aumento de corrente é porque conforme a profundidade aumenta é preciso mais corrente para evitar o curto circuito, o que interrompe a solda. Este aumento de corrente aumenta a taxa de fusão do eletrodo, desprendendo uma maior quantidade de metal de solda.

Neste trabalho, foi decidido usar o valor de corrente mínimo necessário para manter o arco aberto e obter soldas com uma boa aparência. Os valores de corrente de 100 A e 120 A são resultado de testes anteriores nos quais se procurava a repetibilidade e facilidade de abertura de arco com os valores mínimos de corrente. O motivo pelo qual decidiu-se usar de corrente baixa é por causa da posição sobre cabeça, já que a experiência mostra que quanto maior a corrente, maior desprendimento de metal fundido da poça de fusão e maior velocidade de soldagem, o que causa mordeduras fora de tolerância e de modo geral uma aparência de cordão muito ruim.

As macrografias mostradas nas Figuras 4.8 até 4.16 exemplificam as variações de geometria por causa da profundidade (maior profundidade implica em maior largura de cordão), corrente e ângulo.

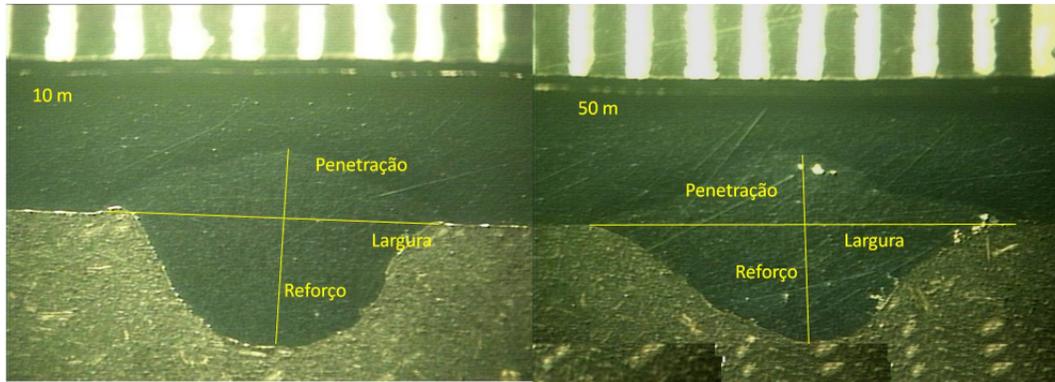


Figura 4.8. Comparação de cordões obtidos com ângulo de chapa 10°, ângulo trabalho 40° a 10 e 50 m.

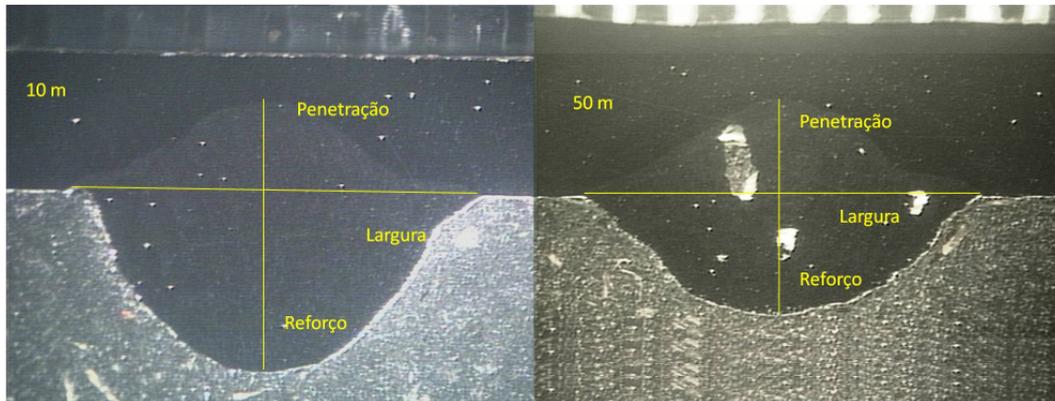


Figura 4.9. Comparação de cordões obtidos com ângulo de chapa 30°, ângulo trabalho 40° a 10 e 50 m.

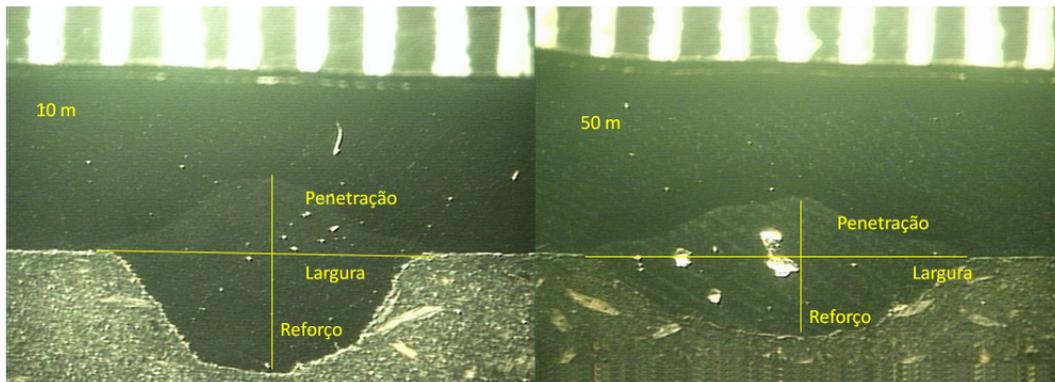


Figura 4.10. Comparação de cordões obtidos com ângulo de chapa 70°, ângulo de trabalho 40° a 10 e 50 m.

Já que para cada ângulo de chapa foram feitas soldas com três ângulos de trabalho, nas tabelas seguintes analisa-se qual é o melhor ângulo de trabalho para cada ângulo de chapa.

Nas Tabelas 4.4 à 4.6 apresentam-se as dimensões obtidas na medição da largura, reforço e penetração com distintos ângulos de trabalho a 10 metros de profundidade.

Observa-se que a tendência é que ao aumento do ângulo de trabalho, o tamanho de largura, reforço, penetração e área total diminuem.

Percebe-se que o único caso no qual a diferença porcentual do reforço é maior que a penetração é no caso das soldas feitas com ângulo de chapa  $\alpha$  a 10°. Isso talvez seja consequência da gravidade já que a força de gravidade esta completamente exercida na vertical pelo que fica mais difícil para a escória segurar o metal fundido. Portanto

aumentando o ângulo  $\alpha$ , o metal de solda fica melhor segurado e é obtido um menor reforço e maior penetração.

Tabela 4.4. Dimensões obtidas com ângulo chapa a 10° a 10 m. Unidades mm.

Parâmetros medidos	(1.1) Ângulo trabalho 40°	(2.1) Ângulo trabalho 50°	(3.1) Ângulo trabalho 60°	Tendência	Diferença % entre maior e menor valor
Largura	5,89	5,64	4,93	↓	16,30
Reforço	2,08	1,74	1,58	↓	24,04
Penetração	1,17	1,15	0,96	↓	17,95
Área total (mm <sup>2</sup> )	11,54	9,28	7,64	↓	33,80

Tabela 4.5. Dimensões obtidas com ângulo chapa a 30° a 10 m. Unidades mm.

Parâmetros medidos	(4.1) Ângulo trabalho 40°	(5.1) Ângulo trabalho 50°	(6.1) Ângulo trabalho 60°	Tendência	Diferença % entre maior e menor valor
Largura	5,39	5,25	5,08	↓	5,75
Reforço	3,11	2,86	2,70	↓	13,18
Penetração	1,97	1,81	1,61	↓	18,27
Área total (mm <sup>2</sup> )	9,95	8,72	8,01	↓	19,50

Tabela 4.6. Dimensões obtidas com ângulo chapa a 70° a 10 m. Unidades mm.

Parâmetros medidos	(7.1) Ângulo trabalho 40°	(8.1) Ângulo trabalho 50°	(9.1) Ângulo trabalho 60°	Tendência	Diferença % entre maior e menor valor
Largura	5,44	5,19	4,95	↓	9,01
Reforço	3,01	2,62	2,46	↓	18,27
Penetração	1,85	1,62	1,42	↓	23,24
Área total (mm <sup>2</sup> )	9,59	8,15	7,18	↓	25,13

Nestas tabelas pode-se perceber que o melhor ângulo de trabalho para soldar, ainda variando o ângulo da chapa é 40°, já que apresenta os maiores valores em todos os parâmetros medidos.

Nas Tabelas 4.7 a 4.9 se apresentam as dimensões obtidas na medição da largura, reforço e penetração com distintos ângulos de trabalho a 50 metros de profundidade.

A 50 metros o comportamento é totalmente distinto ao apresentado nas soldas a 10 metros, já que nos valores de ângulo  $\alpha$  a  $10^\circ$  e  $30^\circ$  os ângulos de trabalho de  $50^\circ$  e  $60^\circ$  os valores das medidas incrementam, mas, não significativamente entre eles. A diferença é de centésimos de milímetro.

No caso dos valores obtidos no ângulo  $\alpha$  a  $70^\circ$ , nos ângulos de trabalho de  $50^\circ$  e  $60^\circ$  os valores diminuem. Estas pequenas variações centesimais de milímetro podem ser resultado do aumento na quantidade e tamanho de poros presentes nas soldas.

Tabela 4.7. Dimensões obtidas com ângulo chapa a  $10^\circ$  a 50 m. Unidades mm.

Parâmetros medidos	(1.5) Ângulo trabalho $40^\circ$	(2.5) Ângulo trabalho $50^\circ$	(3.5) Ângulo trabalho $60^\circ$	Tendência	Diferença % entre maior e menor valor
Largura	7,25	7,12	6,82	↓	5,91
Reforço	3,12	2,79	2,87	↓ ↑	10,57
Penetração	1,67	1,51	1,53	↓ ↑	9,58
Área total (mm <sup>2</sup> )	12,58	11,78	10,74	↓	14,67

Tabela 4.8. Dimensões obtidas com ângulo chapa a  $30^\circ$  a 50 m. Unidades mm.

Parâmetros medidos	(4.5) Ângulo trabalho $40^\circ$	(5.5) Ângulo trabalho $50^\circ$	(6.5) Ângulo trabalho $60^\circ$	Tendência	Diferença % entre maior e menor valor
Largura	7,20	6,82	6,43	↓	10,78
Reforço	3,21	2,79	2,85	↓ ↑	13,08
Penetração	1,77	1,55	1,49	↓	15,81
Área total (mm <sup>2</sup> )	14,22	10,72	10,50	↓	26,20

Tabela 4.9. Dimensões obtidas com ângulo chapa a  $70^\circ$  a 50 m. Unidades mm.

Parâmetros medidos	(7.5) Ângulo trabalho $40^\circ$	(8.5) Ângulo trabalho $50^\circ$	(9.5) Ângulo trabalho $60^\circ$	Tendência	Diferença % entre maior e menor valor
Largura	6,5304	6,1697	5,6264	↓	13,84
Reforço	2,5527	2,8104	1,9623	↑ ↓	30,34
Penetração	1,4688	1,5141	0,9859	↑ ↓	36,36
Área total (mm <sup>2</sup> )	10,2741	10,8507	8,2551	↑ ↓	23,96

Como tem sido referenciado em trabalhos anteriores (BRACARENSE, 2010) (PESSOA, 2004), com a maior profundidade, a largura do cordão de solda aumenta, isso pode ser confirmado comparando os valores entre 10 e 50 m.

As soldas feitas com ângulo de trabalho de 40° e ângulo de chapa de 10° e 40° são os que apresentam maiores valores, seguido pelo ângulo de trabalho de 60° mas com uma leve diferença com 50°. Já no caso das soldas feitas com 70° no ângulo de chapa, o comportamento é que os maiores valores são obtidos com o ângulo de trabalho de 50°, seguidos por 40° e 60°.

#### 4.3. Porosidade no metal de Solda

A medição de porosidade foi feita por meio de um sistema de aquisição e análise de imagens. Para cada cordão de solda foram analisadas três seções distintas, como descrito no item 3.1.2 da metodologia aplicada, sendo apresentado como resultado a média dos valores obtidos.

O sistema permite medir poros com área mínima de 0,1 mm<sup>2</sup> para o aumento utilizado para fotografar as imagens (12x). A incerteza da medição, fornecida pelo próprio programa, é proporcional ao fator de forma utilizado para medição da área do poro (quanto mais circular é o poro menor será a incerteza, nos casos de formas muito complexas a incerteza pode chegar a ± 20% (desvio padrão da média)).

##### 4.3.1 – Porosidade em função da profundidade, ângulo da chapa e ângulo de trabalho.

O gráfico da Figura 4.11 mostra a variação da porosidade medida nas soldas em função da profundidade. É possível observar que a 50 m com ângulo de chapa 70° é obtida a maior quantidade de porosidade.

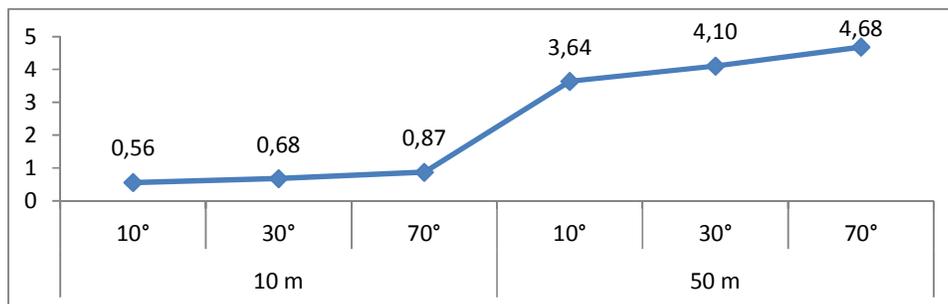


Figura 4.11. Média de porosidade em função da profundidade e ângulo de chapa.

Na Tabela 4.10 percebe-se que a solda sobre cabeça apresenta o comportamento da porosidade muito similar ao descrito na literatura onde os valores de porosidade diminuem do início ao final do cordão (PESSOA, 2007). Nesta pesquisa, 67 % da porosidade diminui do início ao fim do cordão de solda tanto nas soldas a 10 quanto nas de 50 metros de profundidade. O 33 % restante das soldas, as quais não se comportam desta forma, foram para 10 metros as feitas com ângulo de chapa a 10° e para as soldas feitas a 50 metros o ângulo de chapa foi de 30°. Mas nota-se que a diferença entre o valor máximo e mínimo nos dois casos não ultrapassa 1,8% no maior caso (50 m).

Tabela 4.10. Média de distribuição da porosidade por cordão para cada ângulo de chapa.

Profundidade	Ângulo chapa	Posição	Cordão 1	Cordão 2	Cordão 3	Média	Tendência
			Média % Porosidade	Média % Porosidade	Média % Porosidade	Total	
10 m	10°	A	0,62	0,43	0,46	0,50	
		B	0,51	0,78	0,31	0,53	
		C	1,33	0,26	0,33	0,64	
	30°	A	0,80	0,88	0,64	0,77	
		B	0,69	0,29	0,67	0,55	
		C	1,13	0,74	0,37	0,75	
	70°	A	1,69	0,58	0,79	1,02	
		B	0,97	0,64	0,52	0,71	
		C	0,86	0,26	1,56	0,89	
50 m	10°	A	4,73	5,00	6,02	5,25	
		B	0,78	1,33	4,73	2,28	
		C	6,11	2,03	3,59	3,91	
	30°	A	5,34	1,80	2,55	3,23	
		B	5,93	5,45	3,71	5,03	
		C	3,55	4,70	3,90	4,05	
	70°	A	5,51	3,75	6,90	5,39	
		B	4,52	2,89	5,36	4,26	
		C	4,58	2,36	6,25	4,39	

Nas Figuras 4.12 a 4.14 analisa-se com detalhe a distribuição da média de porosidade para cada cordão em cada condição de ângulo de chapa a 10 metros.

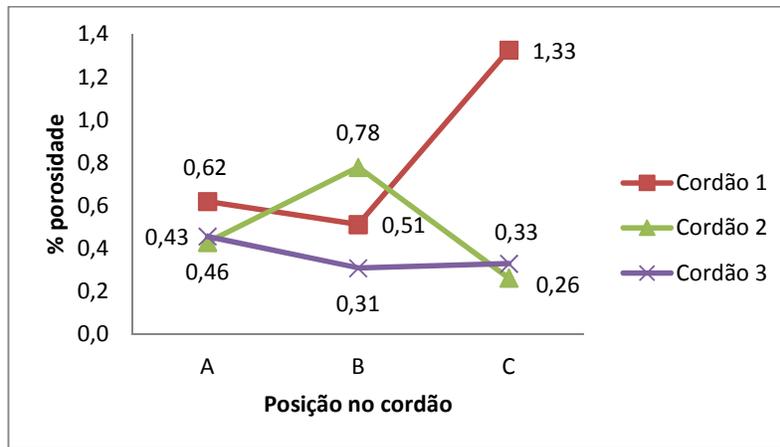


Figura 4.12. Média do % porosidade dos 3 cordões para ângulo de chapa 10° a 10 m.

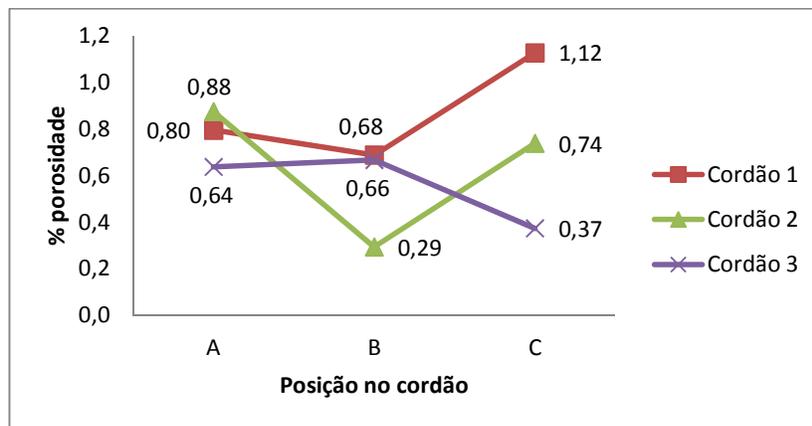


Figura 4.13. Média do % porosidade dos 3 cordões para ângulo de chapa 30° a 10 m.

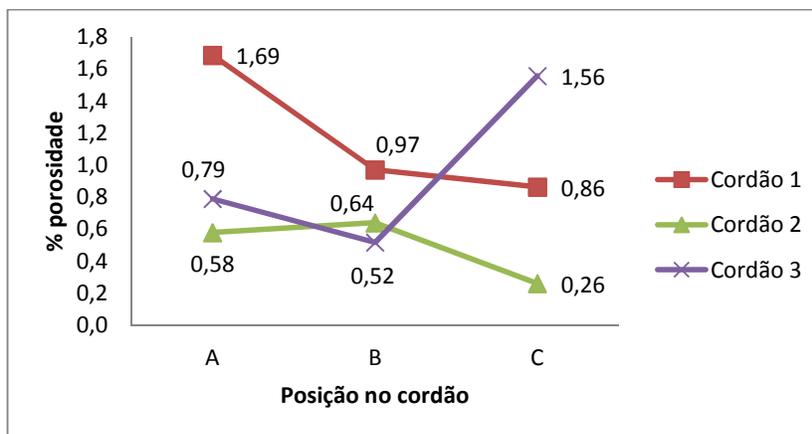


Figura 4.14. Média da % porosidade dos 3 cordões para ângulo de chapa 70° a 10 m.

Onde é possível perceber que existe uma tendência a diminuir a porosidade do início da solda até a metade do cordão e em alguns casos a porosidade aumenta na parte final.

Na Tabela 4.11 são apresentadas as médias de porosidades obtidas para cada ângulo de chapa com os três ângulos de trabalho a 10 metros de profundidade. Nesta tabela percebe-se que a maior área de poros está presente nas soldas feitas com ângulo de chapa 30° e ângulo de trabalho 40°. A menor porosidade foi nas soldas feitas com ângulo de chapa 10° e ângulo de trabalho 40°. A Figura 4.15 apresenta o total das médias de porosidade.

Tabela 4.11. Porosidade média dos 3 cordões por condição a 10 m.

Condição	Ângulo Chapa ( $\alpha$ )	Ângulo trabalho ( $\theta$ )	Ângulo Guia ( $\beta$ )	Média dos 3 cordões
1.1	10°	40°	40°	0,34
2.1		50°	30°	0,64
3.1		60°	20°	0,69
4.1	30°	40°	20°	0,98
5.1		50°	10°	0,37
6.1		60°	0°	0,68
7.1	70°	40°	-20°	0,45
8.1		50°	-30°	1,04
9.1		60°	-40°	1,13

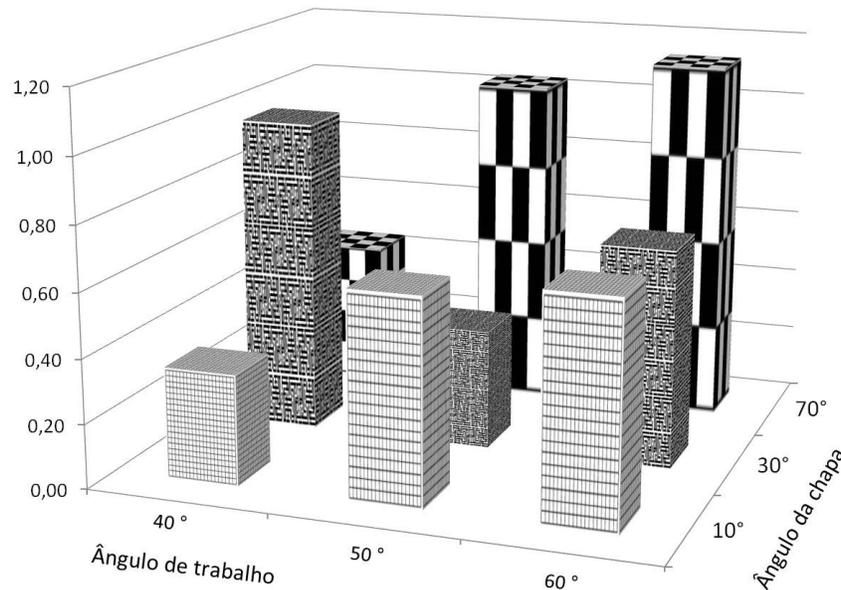


Figura 4.15. Distribuição da porosidade a 10 m para cada ângulo de chapa e ângulo de trabalho.

Nas Figuras 4.16 a 4.18 analisa-se com detalhe a distribuição da média de porosidade para cada cordão em cada condição de ângulo de chapa a 50 metros.

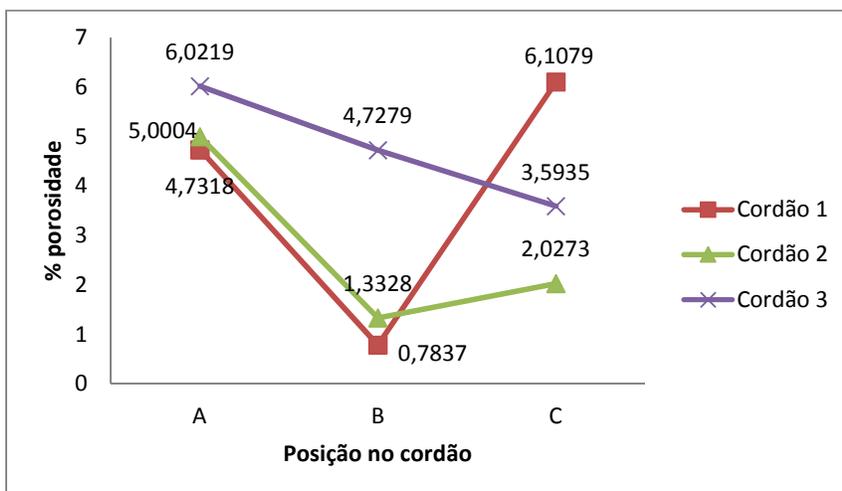


Figura 4.16. Média do % porosidade dos 3 cordões para ângulo de chapa 10° a 50 m.

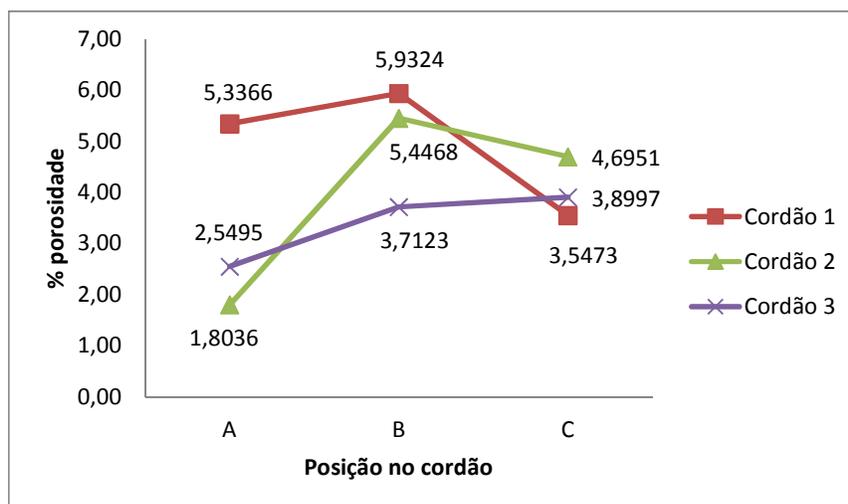


Figura 4.17. Média do % porosidade dos 3 cordões para ângulo de chapa 30° a 50 m.

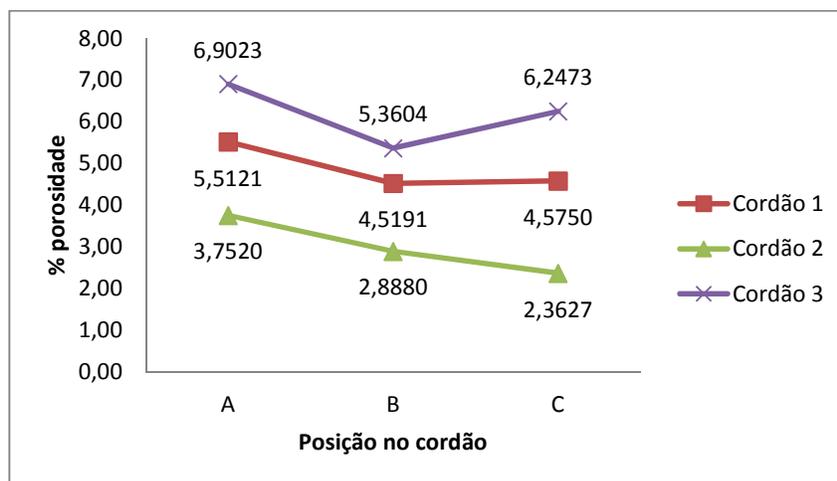


Figura 4.18. Média do % porosidade dos 3 cordões para ângulo de chapa 70° a 50 m.

Onde é possível perceber que existe uma tendência a diminuir a porosidade do início da solda até a metade do cordão, exceto no caso da chapa com 30°, no qual na metade da solda apresenta aumento de porosidade para depois diminuir.

Na Tabela 4.12 são apresentadas as médias de porosidades obtidas para cada ângulo de chapa com os três ângulos de trabalho a 50 metros de profundidade. Nesta tabela percebe-se que a maior quantidade de poros está presentes nas soldas feitas com ângulo de chapa 70° e ângulo de trabalho 50°. A menor porosidade foi nas soldas feitas com ângulo de chapa 10° e ângulo de trabalho 40°. A Figura 4.19 apresenta o total de médias de porosidade.

Tabela 4.12. Média dos 3 cordões por condição a 50 m.

Condição	Ângulo Chapa	Ângulo trabalho	Ângulo Guia	Média dos 3 cordões
1.5	10°	40°	40°	2,74
2.5		50°	30°	4,02
3.5		60°	20°	4,15
4.5	30°	40°	20°	3,51
5.5		50°	10°	3,81
6.5		60°	0°	4,99
7.5	70°	40°	-20°	4,05
8.5		50°	-30°	5,30
9.5		60°	-40°	4,69

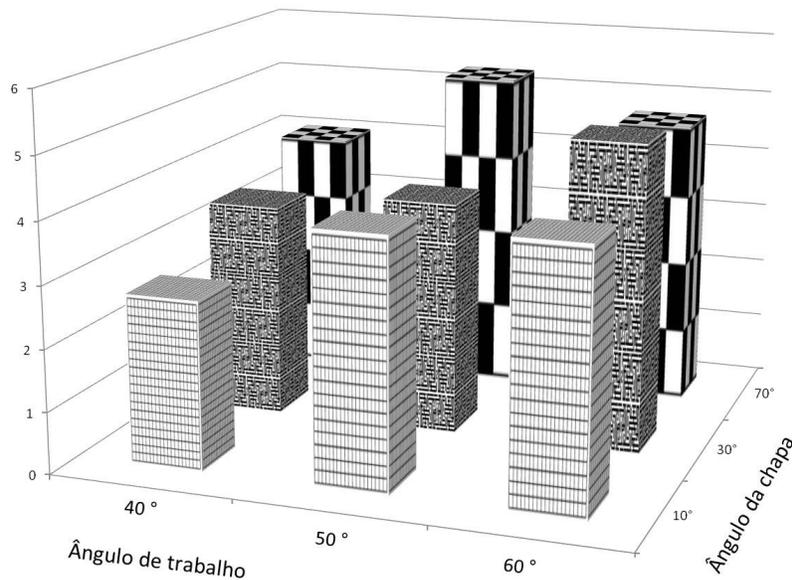


Figura 4.19. Distribuição da porosidade a 50 m para cada ângulo de chapa e ângulo de trabalho.

Na Figura 4.20 está plotado o total de condições nas quais foram feitas as soldas deste trabalho de pesquisa. Percebe-se que o melhor ângulo de trabalho tanto para 10 metros como para 50 m é 40° e ângulo de chapa 10°. O pior ângulo de trabalho na mesma profundidade é 60° e ângulo de chapa 70°. A tendência que o gráfico apresenta é que quanto menor o ângulo de trabalho e menor o ângulo de chapa, menor será a porosidade apresentada nas soldas.

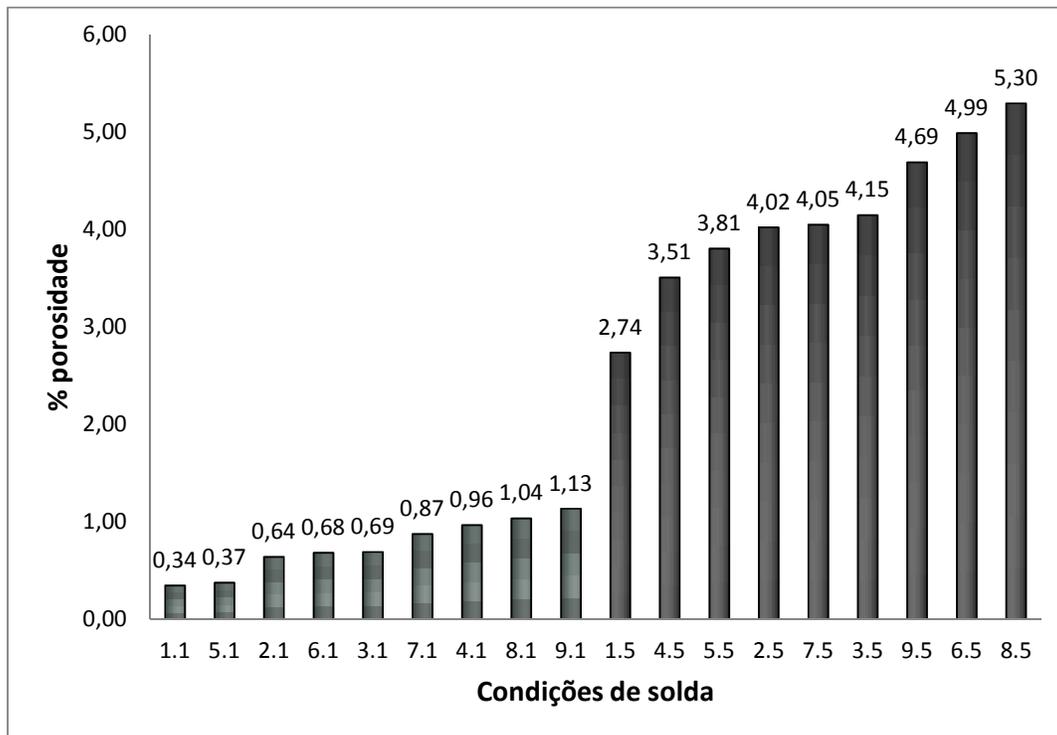


Figura 4.20. Média de porosidade para todas as condições de soldagem.

Uma questão importante a conhecer além da quantidade de porosidade presente na solda é a localização da mesma. Pessoa (2004) propõe que é mais fácil remover a porosidade presente no reforço por meio de esmerilhamento ou pela refusão do cordão no passe seguinte de solda.

Tem que ser considerado que no trabalho anteriormente referenciado, as soldas foram feitas na horizontal, e neste caso as soldas são sobre cabeça, sendo que o comportamento da bolha é distinto, já que sobre cabeça, ela poderia ficar presa no metal fundido por causa da flutuação da bolha.

Na Tabela 4.13 são apresentadas as médias de localização dos poros no cordão de solda obtidas nas profundidades de 10 e 50 metros para cada ângulo de chapa. O cordão é dividido como reforço e penetração.

Tabela 4.13. Distribuição de porosidade segundo profundidade e ângulo da chapa.

Profundidade.	Ângulo $\alpha$	Reforço %	Penetração %
10 m	10 °	47,58	52,42
	30°	45,63	54,37
	70°	37,39	62,61
50 m	10 °	23,76	76,24
	30°	22,81	77,19
	70°	37,52	62,48

Pode-se ver que a maioria dos poros a 10 metros de profundidade estão presentes na parte central do cordão. Isso quer dizer, que do total da porosidade, a metade da porosidade está na zona de penetração e a outra metade no reforço. No caso de soldas a 50 metros de profundidade, a maior área de porosidade encontra-se na penetração. As Figuras 4.21, 4.22 e 4.23 exemplificam este comportamento.

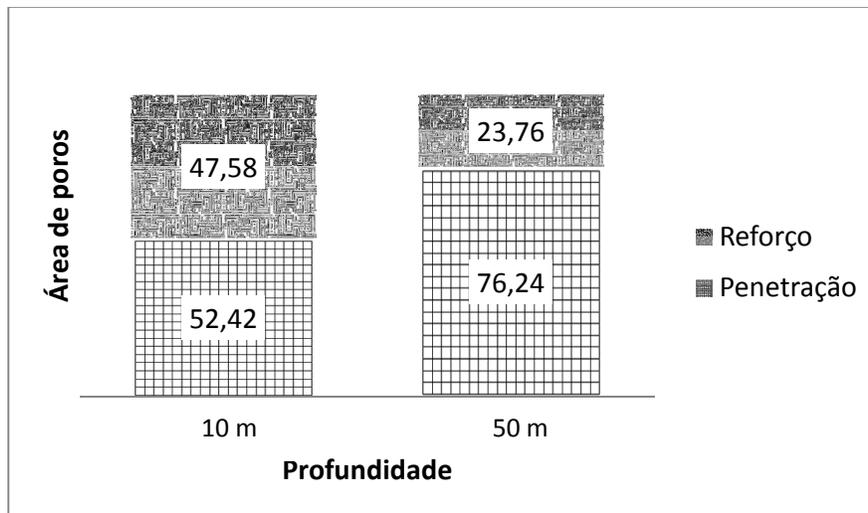


Figura 4.21. Média de distribuição de poros em soldas feitas com chapa a 10° nas duas profundidades.

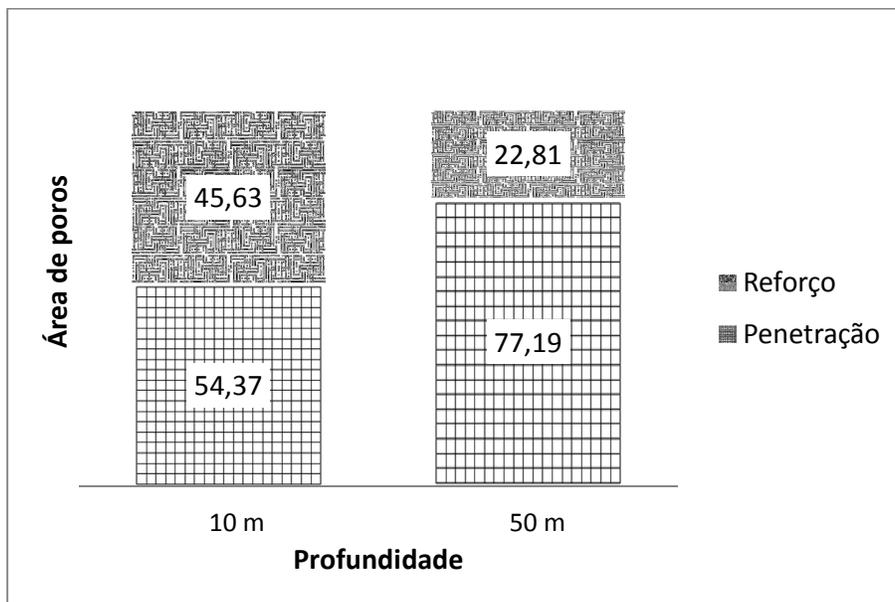


Figura 4.22. Média de distribuição de poros em soldas feitas com chapa a 30° nas duas profundidades.

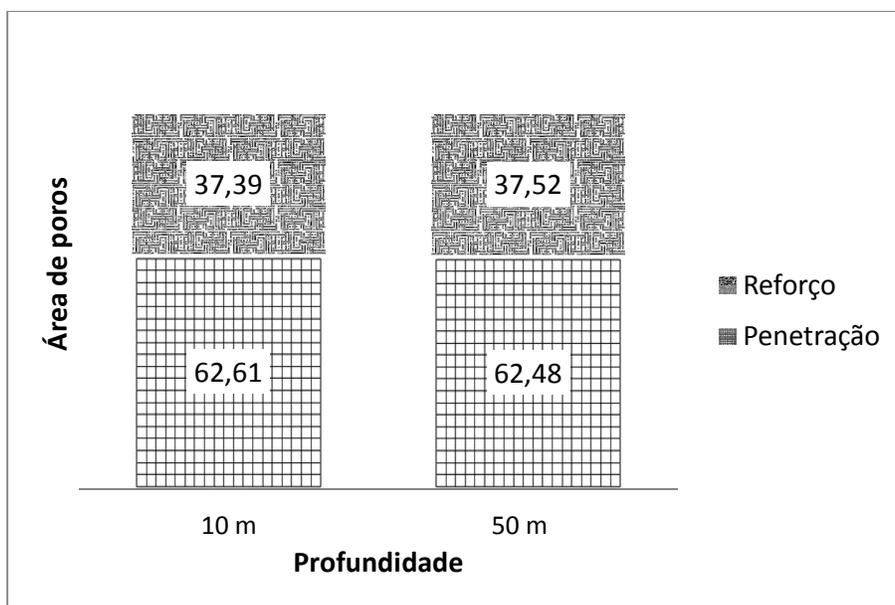


Figura 4.23. Média de distribuição de poros em soldas feitas com chapa a 70° nas duas profundidades.

Nas Figuras 4.24 á 4.26 apresentam-se um das 163 análises de medição feita para conhecer a medição de porosidade, largura, penetração e reforço deste trabalho para profundidades de 10 e 50 metros de profundidade.

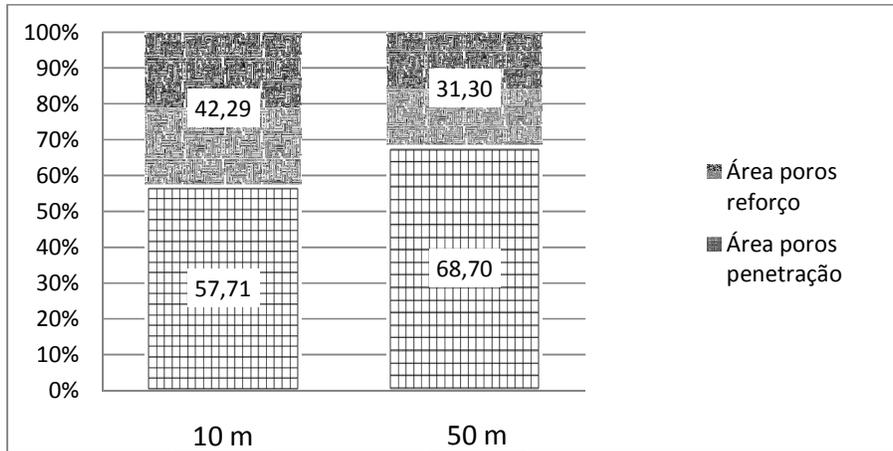


Figura 4.24. Média de distribuição dos poros obtidos na configuração de ângulo de chapa a 10° e ângulo de trabalho a 40°.

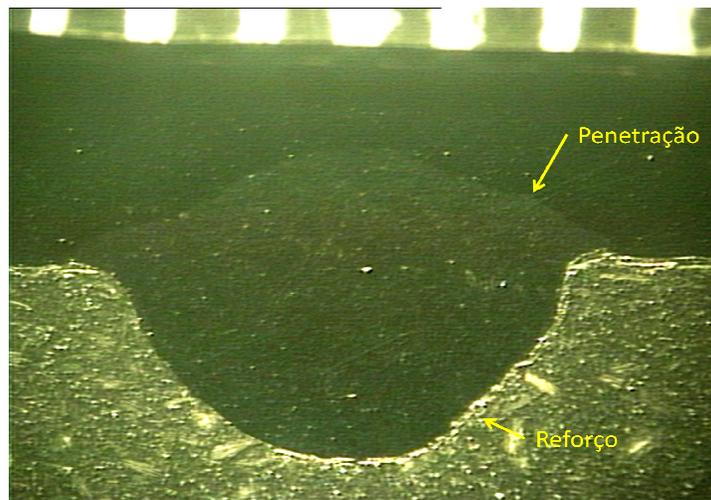


Figura 4.25. Porosidade presente em solda feita a 10 m de profundidade com ângulo de chapa 10° e ângulo de trabalho 40°.

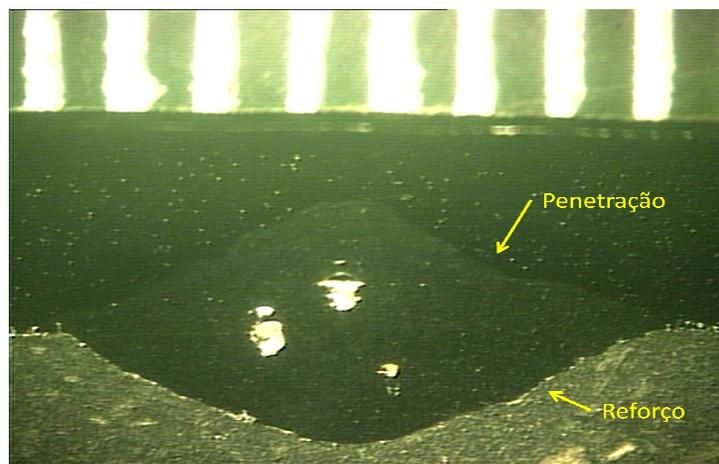


Figura 4.26. Porosidade presente em solda feita a 50 m de profundidade com ângulo de chapa 10° e ângulo de trabalho 40°.

O comportamento da porosidade nas soldas a 10 metros difere muito das feitas a 50 metros e por isso é muito importante conhecer a localização e quantidade de poros no cordão já que pode assim ser escolhida a melhor opção de ângulo de trabalho dependendo do ângulo no qual a peça a soldar se encontrar. A ideia é procurar obter a maior quantidade de poros no reforço, portanto, podem ser eliminados por esmerilhamento.

Na Tabela 4.14 são colocados os valores obtidos nas soldas de cada condição de ângulos e profundidades e nas Figuras 4.27 a 4.29 são plotados os valores contidos na Tabela 4.14 para facilitar o entendimento do comportamento da porosidade em posição transversal do cordão de solda.

Tabela 4.14. Distribuição do percentual de porosidade por condição de solda.

Condição	Área do cordão	% Porosidade
1.1	% poros reforço	42,29
	% poros penetração	57,71
1.5	% poros reforço	31,30
	% poros penetração	68,70
2.1	% poros reforço	49,71
	% poros penetração	50,29
2.5	% poros reforço	16,38
	% poros penetração	83,62
3.1	% poros reforço	50,74
	% poros penetração	49,26
3.5	% poros reforço	23,60
	% poros penetração	76,40
4.1	% poros reforço	29,48
	% poros penetração	70,52
4.5	% poros reforço	24,71
	% poros penetração	75,29
5.1	% poros reforço	64,78
	% poros penetração	35,22
5.5	% poros reforço	31,29
	% poros penetração	68,71
6.1	% poros reforço	42,62
	% poros penetração	57,38
6.5	% poros reforço	12,43
	% poros penetração	87,57
7.1	% poros reforço	58,25
	% poros penetração	41,75
7.5	% poros reforço	37,26
	% poros penetração	62,74
8.1	% poros reforço	34,92
	% poros penetração	65,08
8.5	% poros reforço	34,69
	% poros penetração	65,31
9.1	% poros reforço	18,98
	% poros penetração	81,02
9.5	% poros reforço	40,61
	% poros penetração	59,39

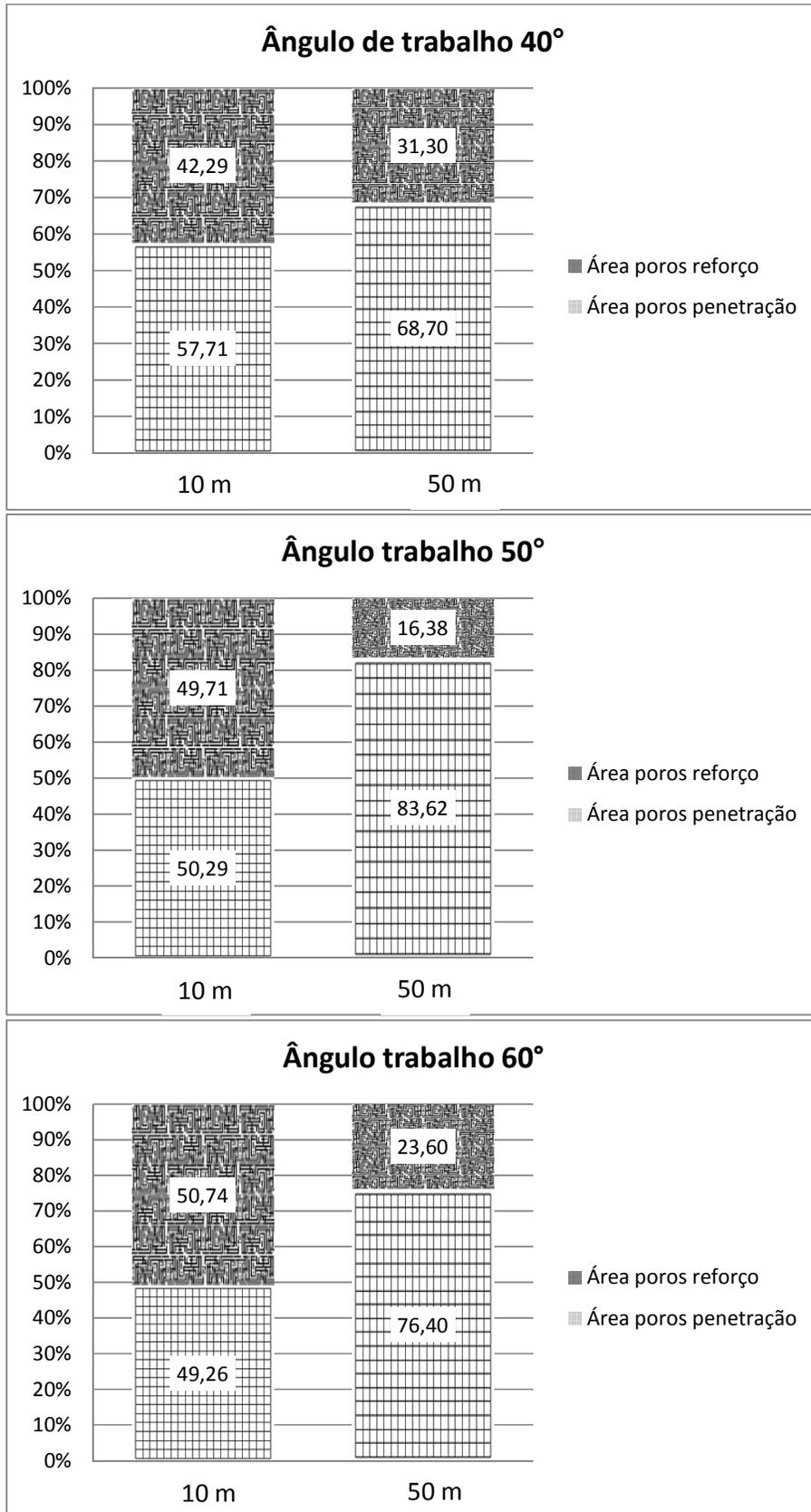


Figura 4.27. Distribuição da porosidade em soldas com chapa a 10° e ângulos de trabalho 40°, 50°, 60°.

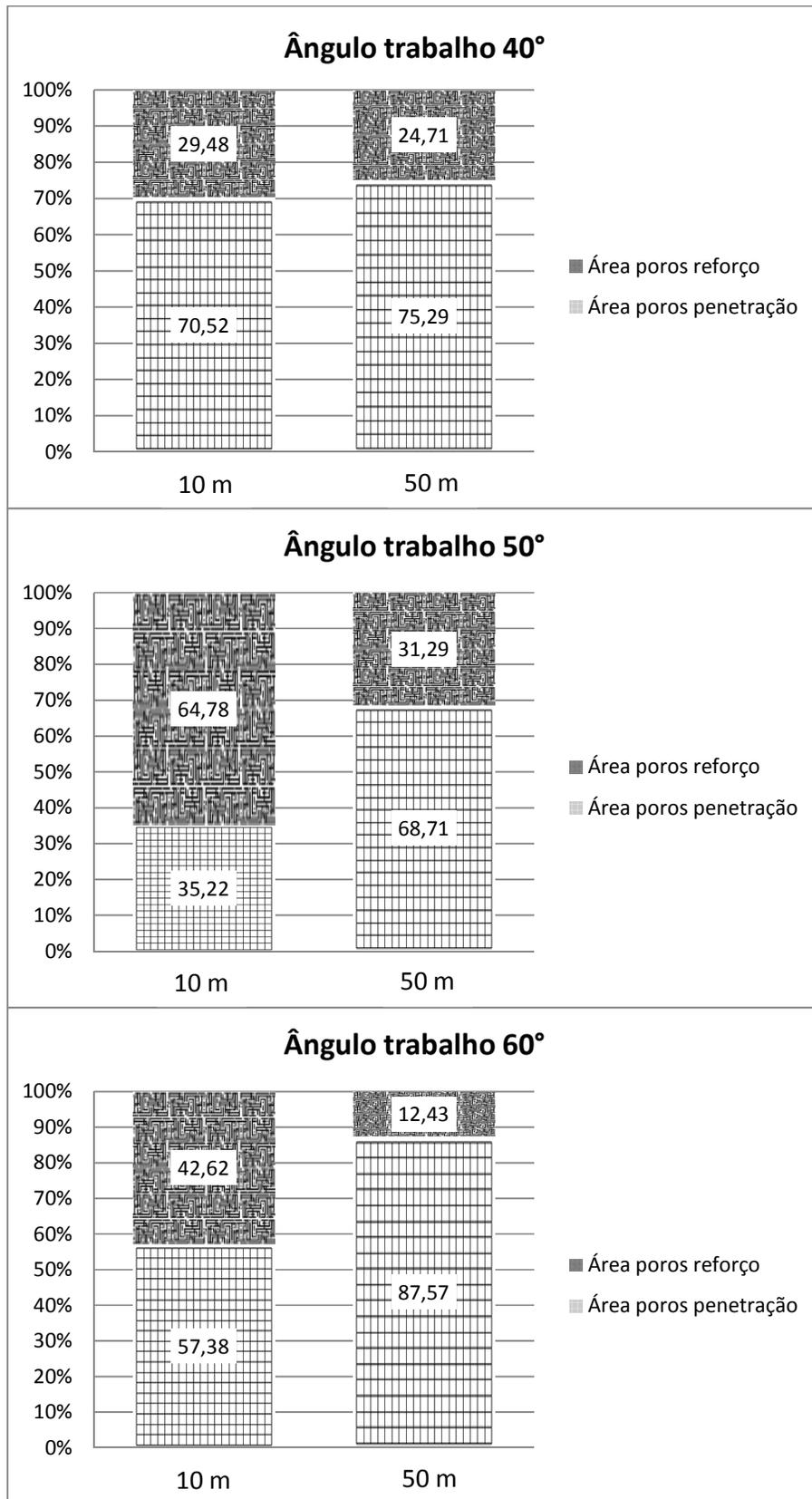


Figura 4.28. Distribuição da porosidade em soldas com chapa a 30° e ângulos de trabalho 40°, 50°, 60°.

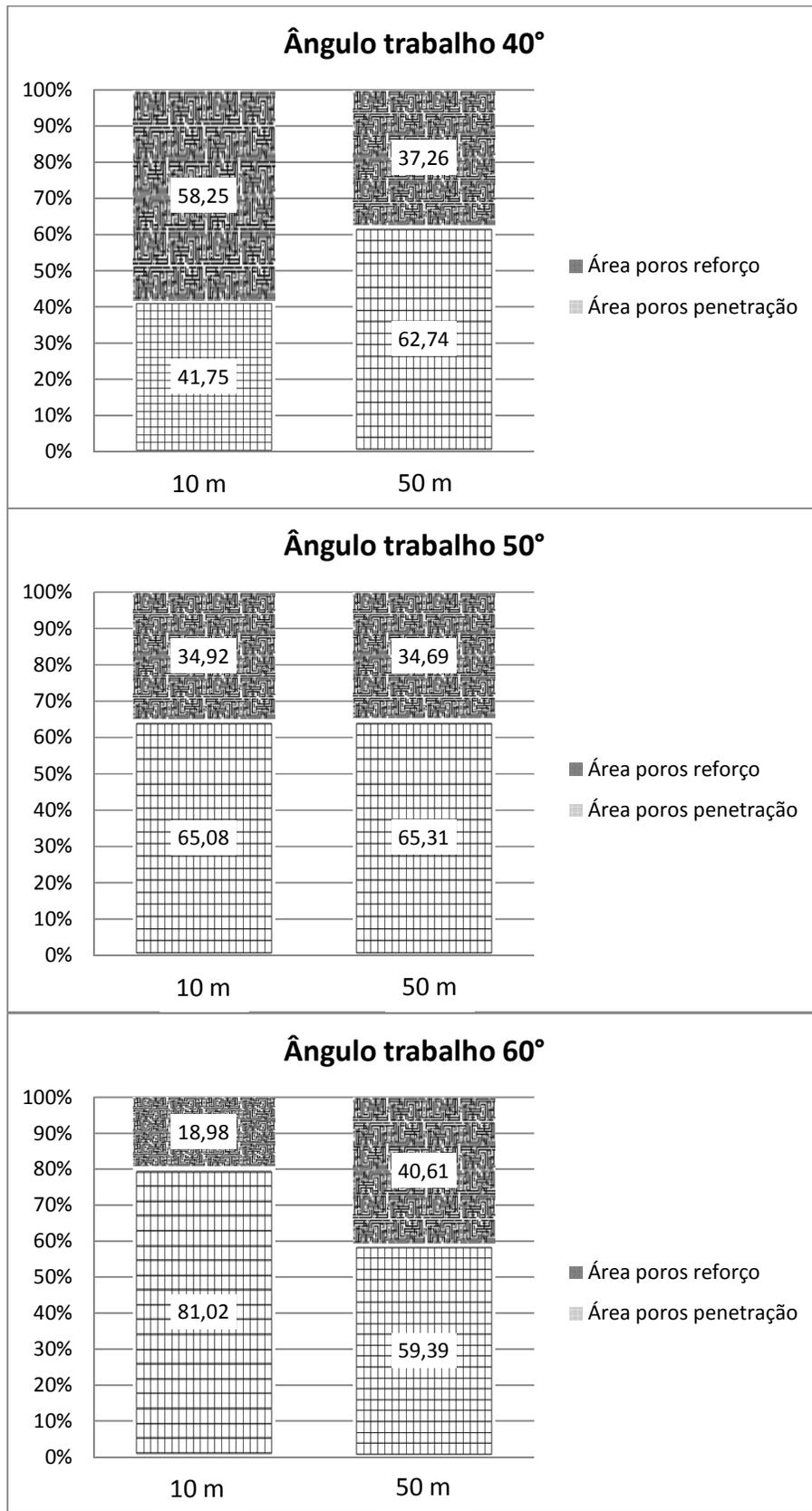


Figura 4.29. Distribuição da porosidade em soldas com chapa a 70° e ângulos de trabalho 40°, 50°, 60°.

No caso das soldas a 10 metros com ângulo de chapa  $10^\circ$ , é melhor soldar com ângulo de trabalho de  $60^\circ$  já que a média de porosidade no reforço é de 50,74 %, depois com ângulo de trabalho  $50^\circ$  com média de porosidade de 49,71 % no reforço e finalmente com ângulo de trabalho  $40^\circ$  com média de porosidade de 42,29.

Para as soldas com ângulo de chapa  $30^\circ$ , é melhor soldar com ângulo de trabalho de  $50^\circ$  já que a média de porosidade no reforço é de 64,78 %, depois com ângulo de trabalho  $60^\circ$  com média de porosidade de 42,62 % no reforço e finalmente com ângulo de trabalho  $40^\circ$  com média de porosidade no reforço de 18,98 %.

Para as soldas com ângulo de chapa  $70^\circ$ , é melhor soldar com ângulo de trabalho de  $40^\circ$  já que a média de porosidade no reforço é de 58,25 %, depois com ângulo de trabalho  $50^\circ$  com média de porosidade de 34,92 % no reforço e finalmente com ângulo de trabalho  $60^\circ$  com média de porosidade no reforço de 19,98 %.

O anteriormente descrito significa que quanto mais horizontal sobre cabeça fique a chapa, o ângulo de trabalho deve ser maior e conforme aumenta o ângulo de chapa para a vertical, o ângulo de trabalho deve diminuir. Isso com a finalidade de obter a maior quantidade possível de poros no reforço da solda.

No caso das soldas a 50 metros de profundidade com ângulo de chapa  $10^\circ$ , é melhor soldar com ângulo de trabalho de  $40^\circ$  já que a média de porosidade no reforço é de 31,30 %, depois com ângulo de trabalho  $60^\circ$  com média de porosidade de 23,60 % no reforço e finalmente com ângulo de trabalho  $50^\circ$  com média de porosidade de 16,38 % no reforço.

Para as soldas com ângulo de chapa  $30^\circ$ , é melhor soldar com ângulo de trabalho de  $50^\circ$  já que a média de porosidade no reforço é de 31,29 %, depois com ângulo de trabalho  $40^\circ$  com média de porosidade de 24,71 % no reforço e finalmente com ângulo de trabalho  $60^\circ$  com média de porosidade no reforço de 12,43 %.

Para as soldas com ângulo de chapa  $70^\circ$ , é melhor soldar com ângulo de trabalho de  $60^\circ$  já que a média de porosidade no reforço é de 40,61 %, depois com ângulo de trabalho  $40^\circ$  com média de porosidade de 37,26 % no reforço e finalmente com ângulo de trabalho  $50^\circ$  com média de porosidade no reforço de 34,69 %.

O anteriormente descrito significa que quanto mais horizontal sobre cabeça fique a chapa, o ângulo de trabalho deve ser o menor e quanto mais tende o ângulo de chapa a vertical, o ângulo de trabalho a usar deve aumentar. Uma coisa que é muito importante perceber é que a maior quantidade de porosidade na área de reforço é obtida nas soldas com ângulo de chapa a  $70^\circ$ .

#### 4.4. Dureza no metal de solda.

Foram feitas duas medições em cada área no cordão (Metal Base, MB – Grão Fino, GF – Grão Grosseiro, GG – Zona Fundida, ZF) da esquerda para a direita na horizontal. A carga aplicada foi de 200 gr. por 15 segundos. A Figura 4.30 mostra as regiões nas quais foram feitas as medidas de dureza.

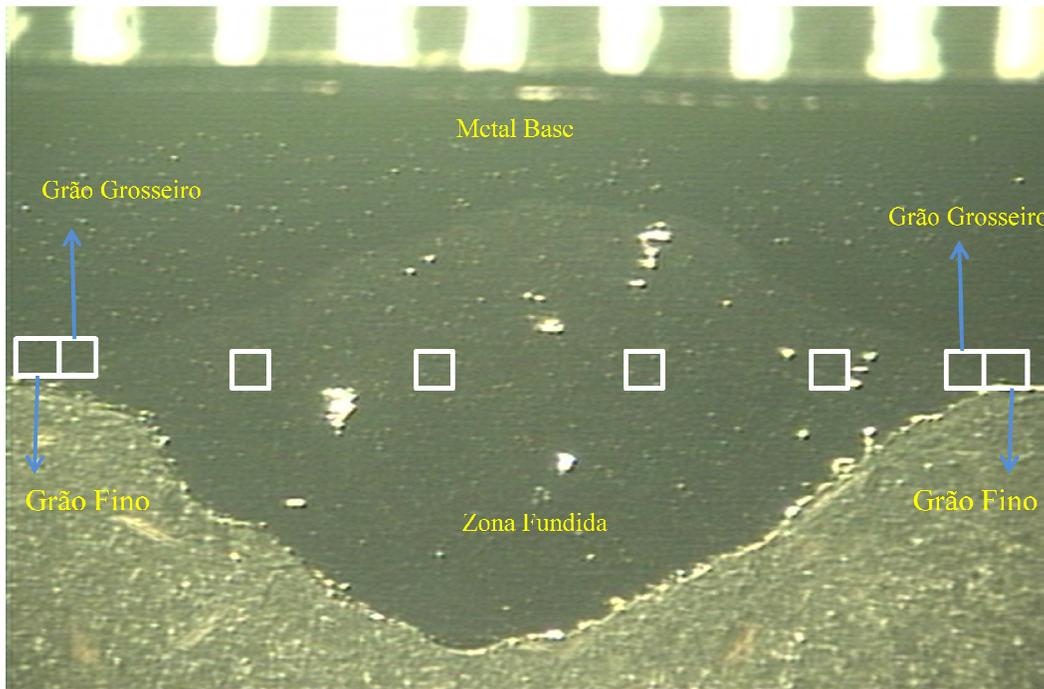


Figura 4.30. Zonas no cordão nas quais foi medida dureza.

A Figura 4.31 apresenta o total de durezas obtidas nas soldas feitas a 10 metros. Percebe-se que as soldas feitas na condição 9 (ângulo chapa  $\alpha = 70^\circ$ , ângulo trabalho  $\theta = 60^\circ$ ) foram aquelas com os maiores valores de dureza. Enquanto as soldas feitas na condição 3 (ângulo chapa  $\alpha = 10^\circ$ , ângulo trabalho  $\theta = 60^\circ$ ) foram aquelas com os menores valores de dureza.

A Figura 4.32 apresenta o total de durezas obtidas nas soldas feitas a 50 metros. Nota-se que as soldas feitas na condição 9 (ângulo chapa  $\alpha = 70^\circ$ , ângulo trabalho  $\theta = 60^\circ$ ) foram aquelas com os maiores valores de dureza. Enquanto as soldas feitas na condição 1 (ângulo chapa  $\alpha = 10^\circ$ , ângulo trabalho  $\theta = 40^\circ$ ) foram aquelas com os menores valores de dureza.

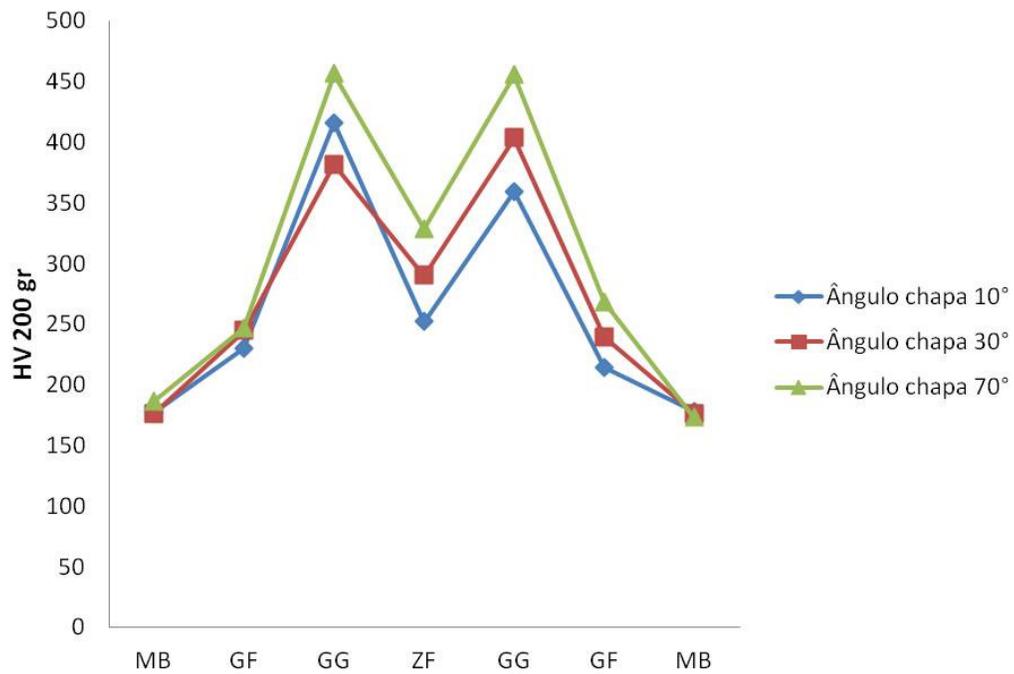


Figura 4.31. Comparação de durezas na condição a 10 m.

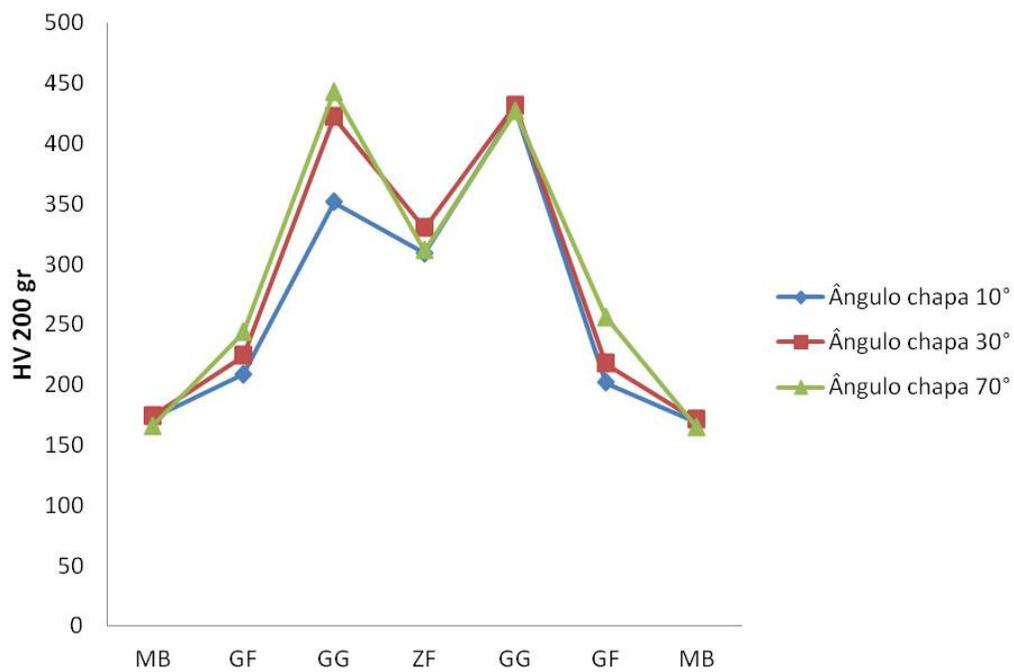


Figura 4.32. Comparação de durezas na condição a 50 m.

Os valores de durezas máximas e mínimas foram obtidos nas soldas a 10 e 50 metros e são apresentados nas Figuras 4.33 e 4.34.

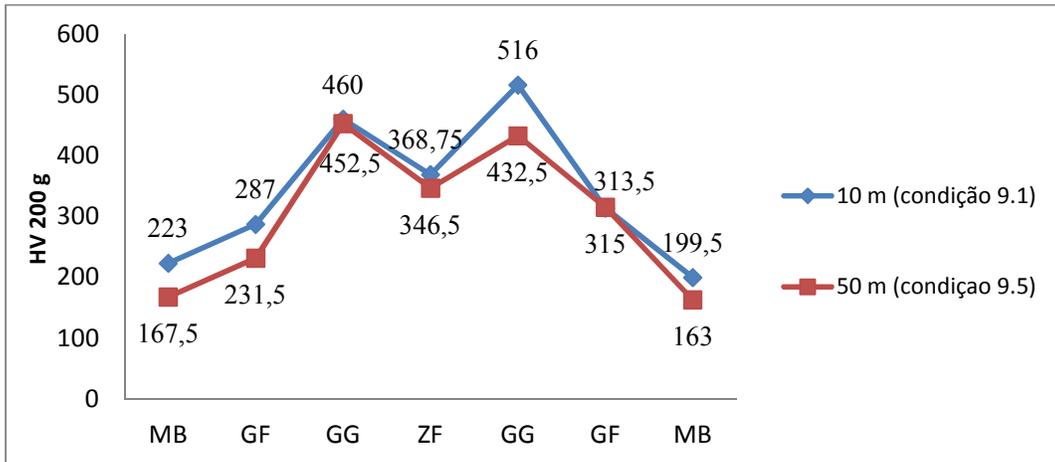


Figura 4.33. Comparativo de durezas máximas a 10 e 50 m.

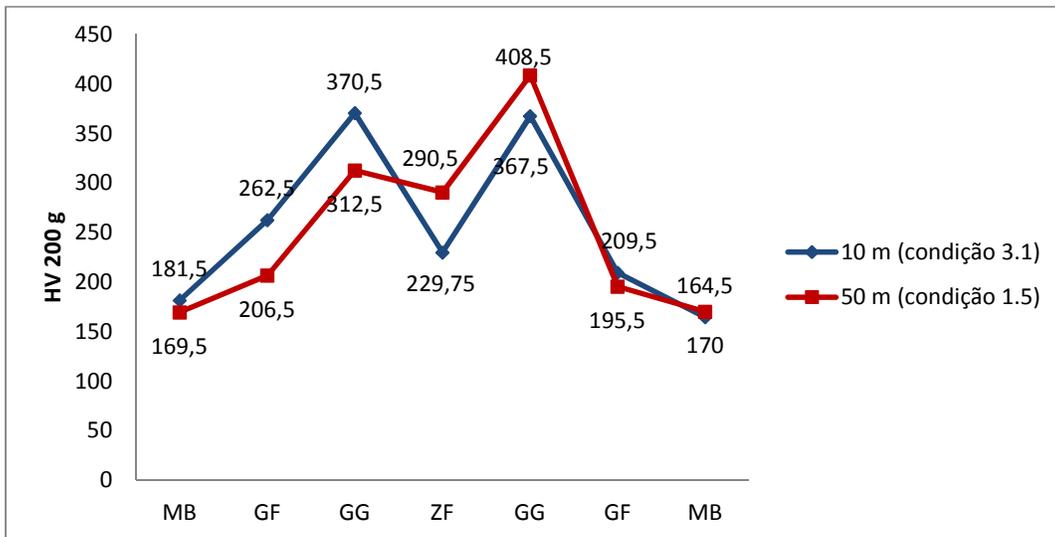


Figura 4.34. Comparativo de durezas mínimas a 10 e 50 m.

A Figura 4.33 apresenta os valores de dureza máxima, onde a característica é que ambas durezas acontecem em soldas feitas em chapas com ângulo  $\alpha$  de  $70^\circ$ . Esta dureza elevada acontece por que o tempo de permanência da bolha sobre a poça de fusão é muito pouco já que tem muita pouca resistência a sua ascensão o que deixa exposta a poça ao contato com a água e conseqüentemente a uma rápida solidificação. É bem sabido que quanto mais rápida solidificação, maior dureza.

Caso contrário ao acontecido nas chapas com ângulo  $\alpha$  de  $70^\circ$ , a Figura 4.34 apresenta os valores mínimos de dureza obtidos e em ambos valores as soldas foram feitas em chapas com ângulo  $\alpha$  de  $10^\circ$ . Neste caso, a bolha tem maior permanência sobre a poça de função, permitindo um resfriamento mais lento. A diferença entre o maior valor de dureza e menor valor de dureza a 10 metros na zona fundida é de 116.75 HV, enquanto que a diferença entre o maior valor de dureza e menor valor de dureza a 50 metros na zona fundida é de 78.25 HV.

Outro ponto a observar entre as duas figuras é que os valores de maior dureza acontecem em soldas feitas a 50 m de profundidade e os valores de menor dureza acontecem a 10 m.

#### 4.5. Microestrutura presente nas soldas.

A nomenclatura usada neste trabalho é apresentada na Tabela 4.15. O aumento usado para analisar as microestruturas presentes na análise metalográfica foi de 500 vezes.

As imagens apresentadas nas Figuras 4.35 a 4.40 reportam diferentes regiões da solda incluindo o metal de base, a região de grão grosseiro, a região de grão fino e a zona fundida, na qual foram realizadas as identificações das fases segundo o IIW. (Carvalho, 1987).

Tabela 4.15. Nomenclatura das fases no metal de solda.

PF	Ferrita Primária
PF(G)	Ferrita de Contorno de Grão
PF(I)	Ferrita poligonal Intragranular
AF	Ferrita Acicular
FS(A)	Ferrita com 2a. Fase alinhada
FS(NA)	Ferrita como 2a. Fase Não Alinhada
FC	Agregado Ferrita-Carboneto
M	Martensita

Foram consideradas para serem apresentadas as soldas feitas nos três ângulos da chapa ( $10^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $70^\circ$ ) e foi fixado o ângulo de trabalho de  $40^\circ$ . Isso por que as microestruturas presentes nas figuras são praticamente as mesmas em todos os cordões e em todas as posições trabalhadas nesta pesquisa.

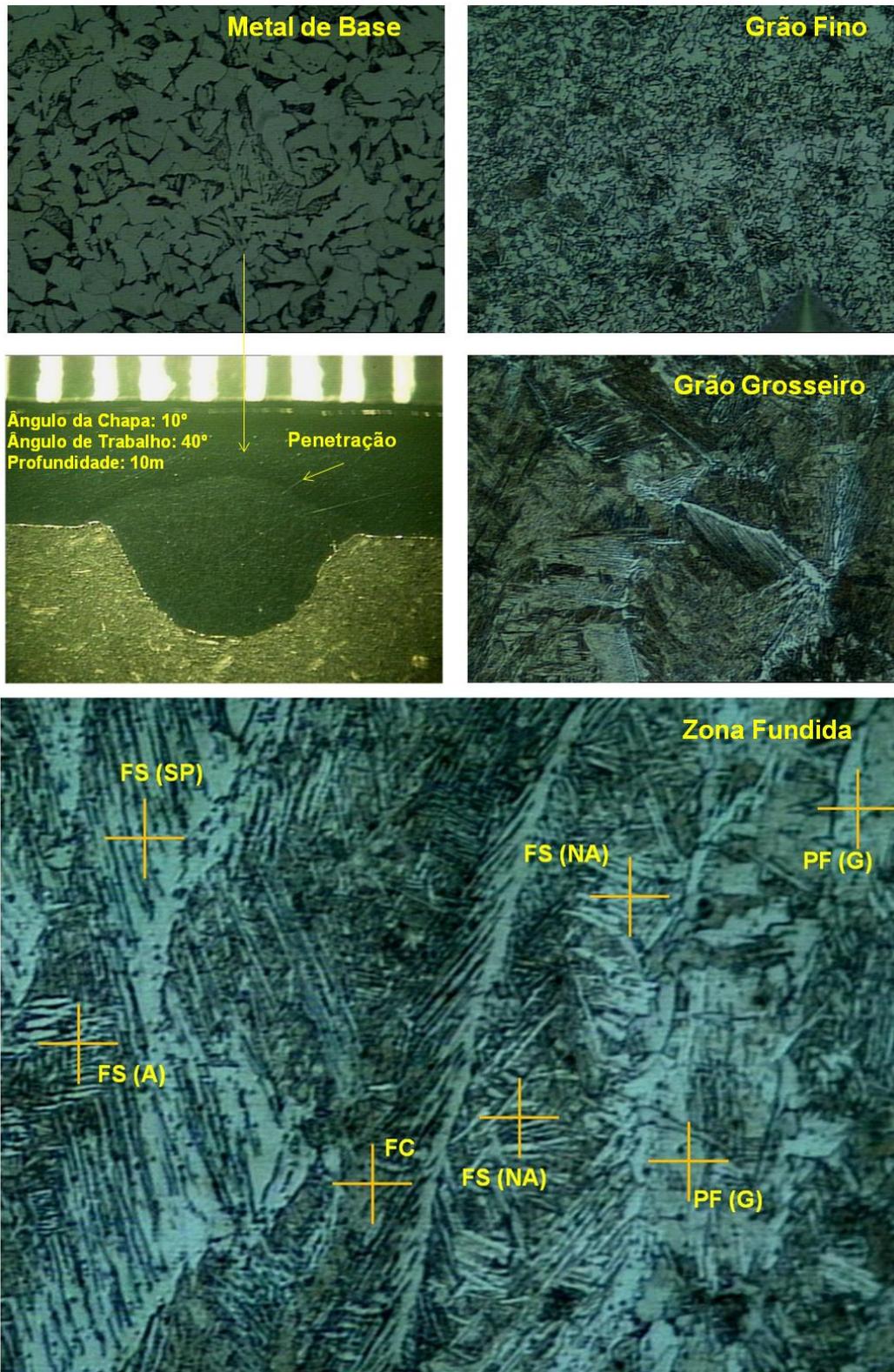


Figura 4.35. Metalografias para solda a 10 metros, ângulo de chapa 10° e ângulo trabalho 40°. Aumento 500X.

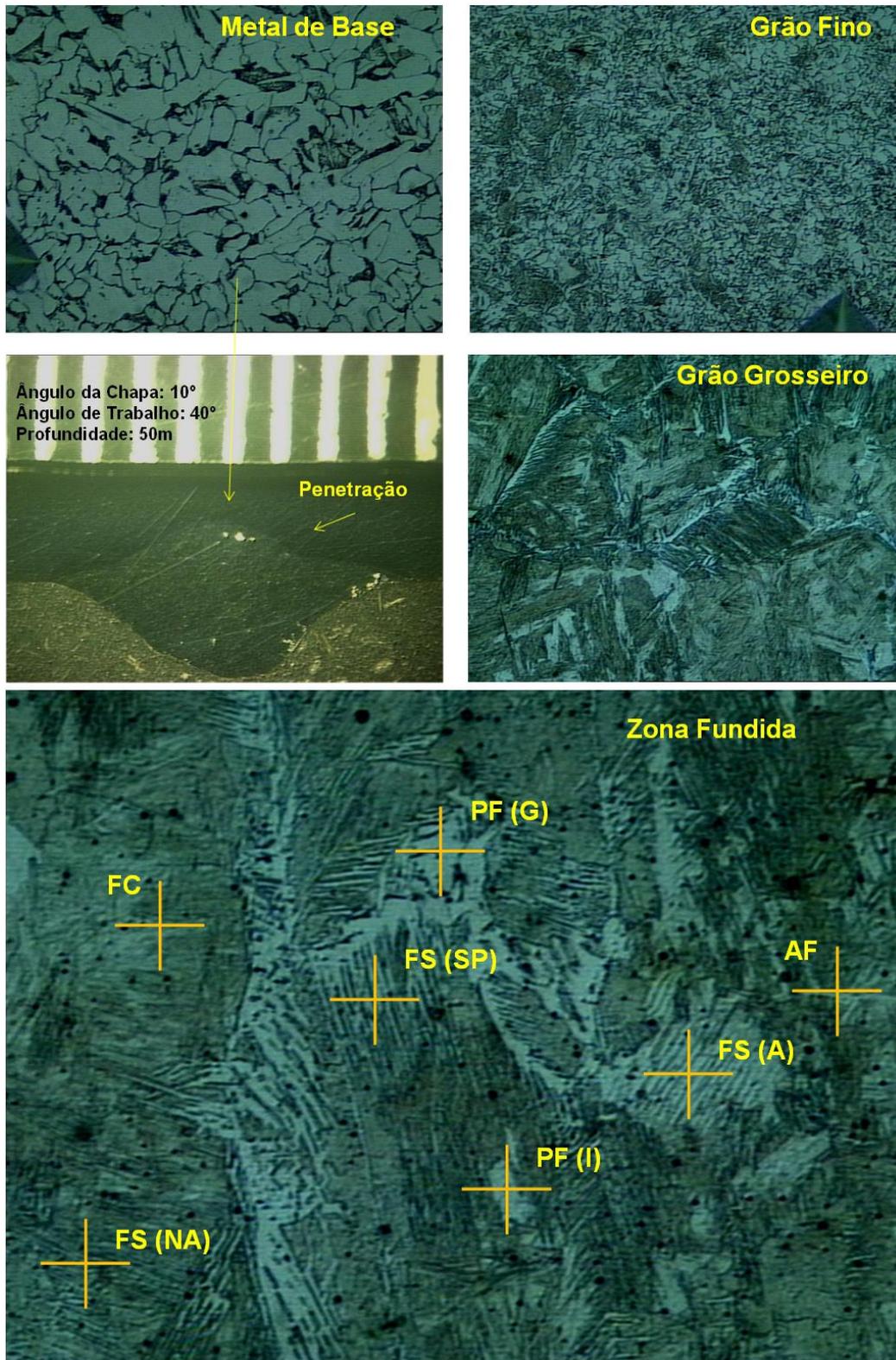


Figura 4.36. Metalografias para solda a 50 metros, ângulo de chapa 10° e ângulo trabalho 40°. Aumento 500X.

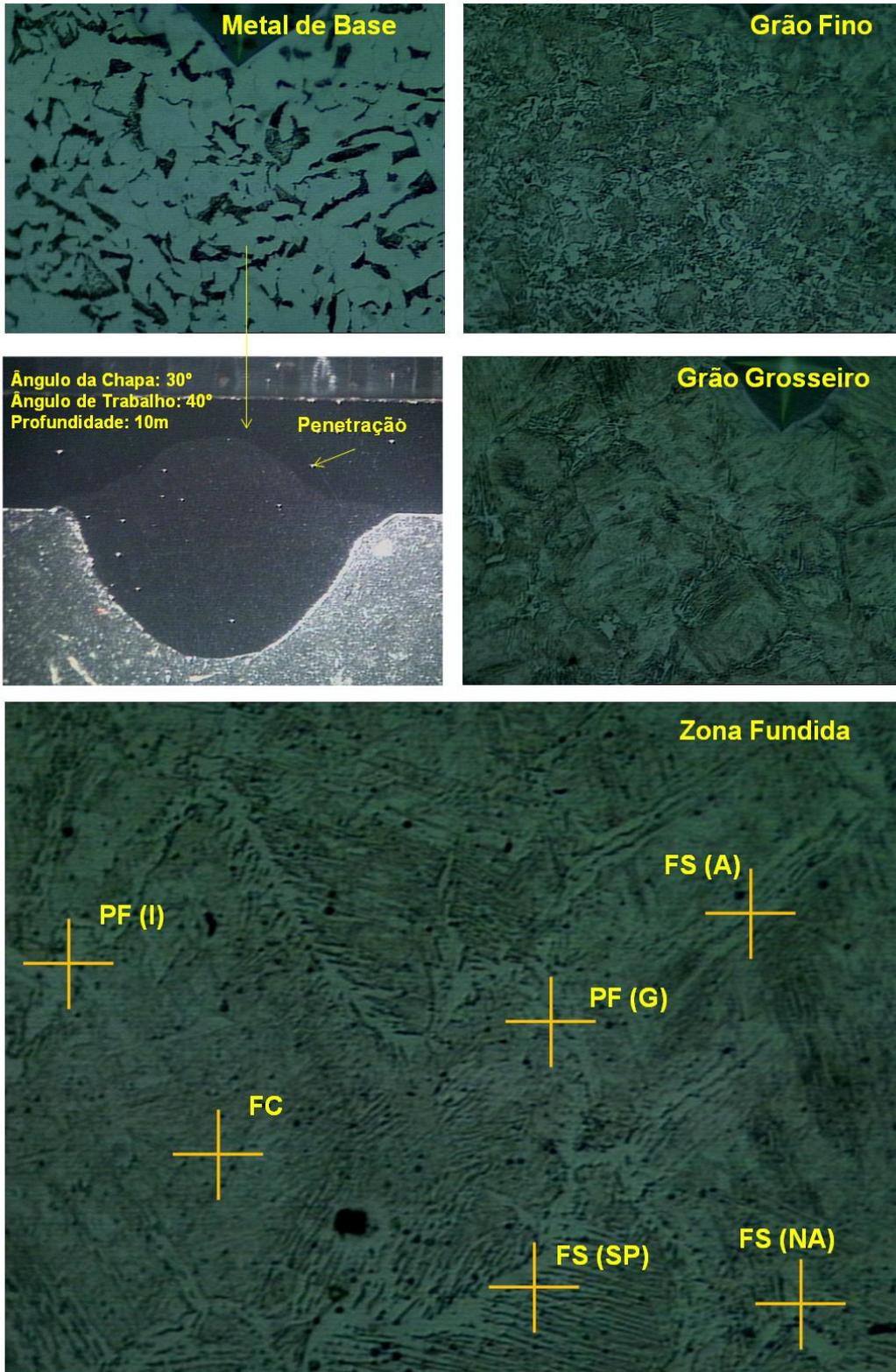


Figura 4.37. Metalografias para solda a 10 metros, ângulo de chapa 30° e ângulo trabalho 40°. Aumento 500X.

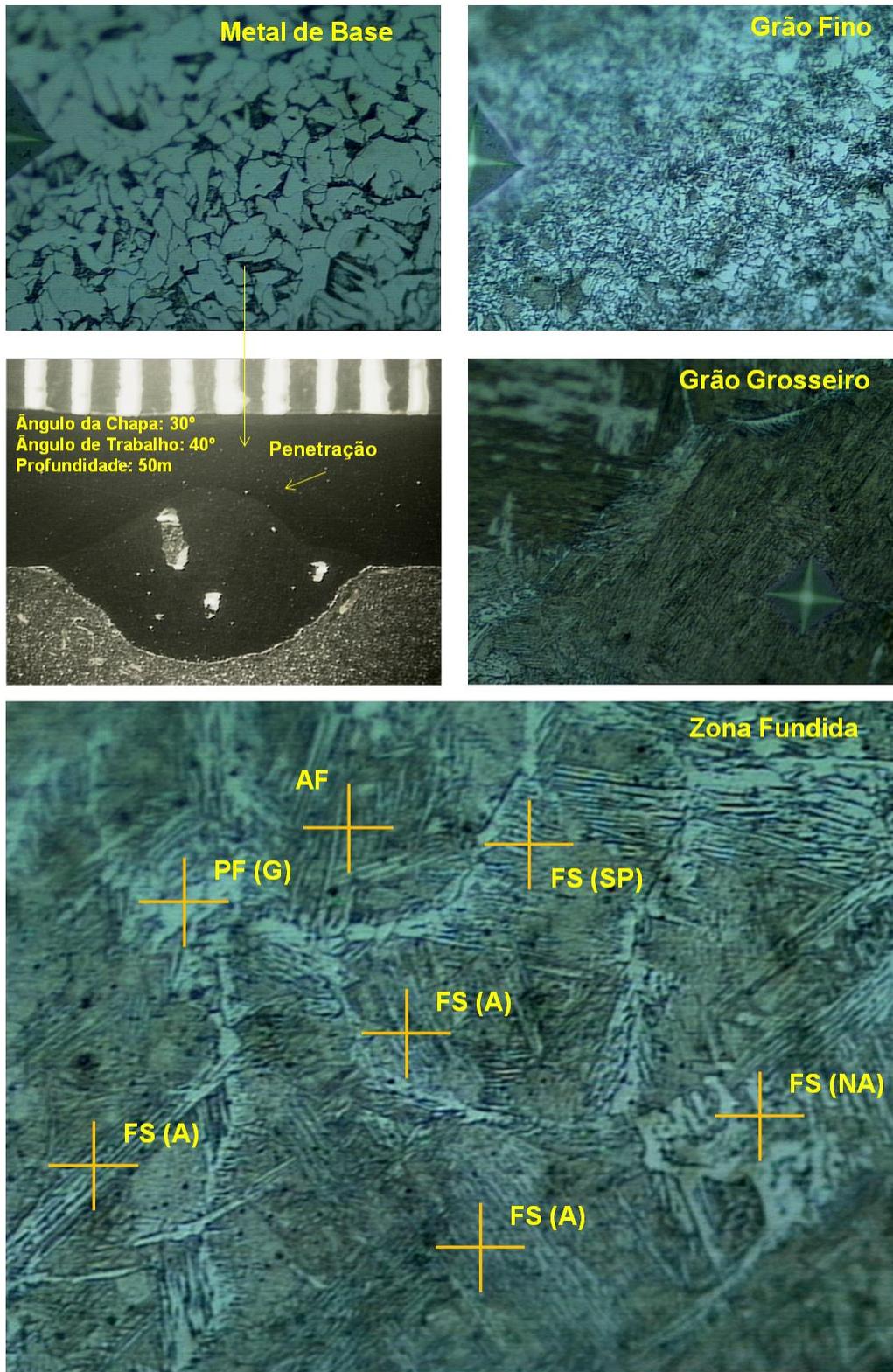


Figura 4.38. Metalografias para solda a 50 metros, ângulo de chapa 30° e ângulo trabalho 40°. Aumento 500X.

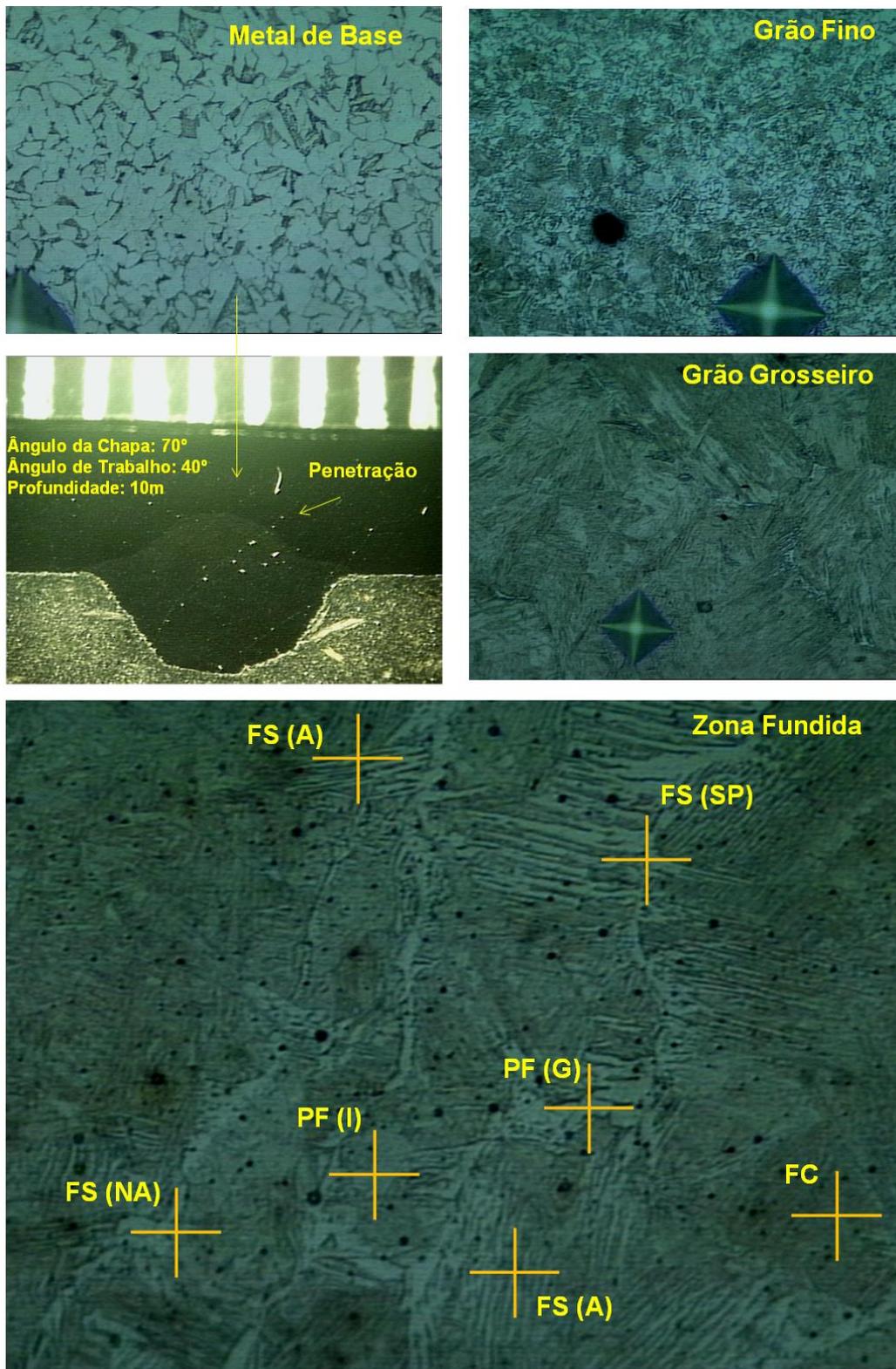


Figura 4.39. Metalografias para solda a 10 metros, ângulo de chapa 70° e ângulo trabalho 40°. Aumento 500X.

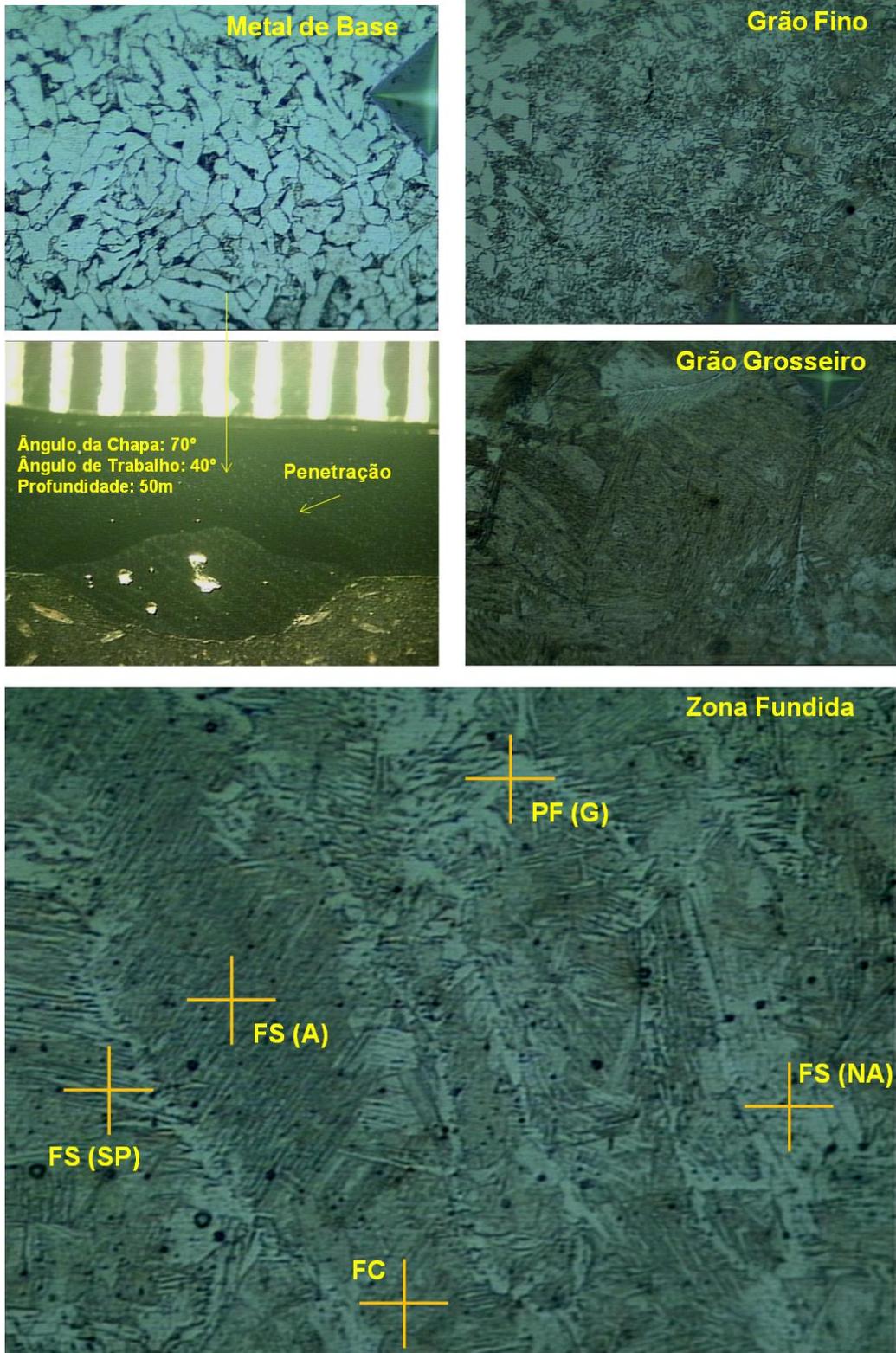


Figura 4.40. Metalografias para solda a 50 metros, ângulo de chapa 70° e ângulo trabalho 40°. Aumento 500X.

## CAPITULO 5 – CONCLUSÕES

O estudo da soldas subaquáticas molhadas em posição sobre cabeça variando a profundidade e o ângulo de trabalho resultou nas seguintes conclusões:

1. A porosidade aumenta como o aumento da profundidade.
2. É necessário 400 % a mais de corrente do qual vai ser usada para fazer a solda só para permitir a abertura do arco.
3. Os melhores valores de ângulo de trabalho são 40°, 50° e 60° já que garantem a fácil abertura do arco.
4. É recomendável o uso de baixa corrente, preferencialmente os valores mínimos recomendados pelo fornecedor de eletrodo para poder depositar o máximo de metal de solda, já que altos valores de corrente vão promover gotejamento do metal de solda por causa da gravidade ao soldar sobre cabeça.
5. A pior aparência em soldagem sobre cabeça a 10 m são as feitas com ângulo de chapa 30° e de trabalho a 60°. No caso de soldas a 50 m são aquelas com ângulo de chapa a 70° e de trabalho a 60°.
6. A penetração fica melhor a 10 m usando ângulo de chapa a 30° e ângulo de trabalho a 40°.
7. A porosidade a 10 m é menor com ângulo de chapa a 10° que aquela obtida com 70°. Acontece o mesmo comportamento nas soldas feitas a 50 m.
8. Para as soldas a 10 m e ângulo de chapa a 10°, observou-se que ocorre uma diminuição da penetração com o aumento do ângulo de trabalho chegando a 50% sendo esta a menor área de poros na penetração aquelas a 60° de ângulo de trabalho. Enquanto que a 50 m a melhor penetração foi usando o ângulo de trabalho 40°. Com 68,7 % de poros na área da penetração.
9. Observou-se que a maior penetração no ângulo de chapa 30° a 10 m aconteceu com ângulo de trabalho de 40° com 70,52 % de área de poros na penetração. Enquanto para 50 m a melhor penetração aconteceu com ângulo de trabalho 40° porem a maior área de poros para esta profundidade foi com ângulo de trabalho 60°.
10. Nas soldas com ângulo de chapa 70° a 10 m observou-se que ocorre uma diminuição da penetração com o aumento do ângulo de trabalho enquanto que a maior penetração é com um ângulo de trabalho de 40° com área de poros na penetração de 41,75% sendo a melhor condição dos 3 ângulos de trabalho para esta profundidade.

11. Para 50 m e 70° de ângulo de chapa a maior penetração foi com ângulo de trabalho de 50° com 65,31% de área de poros na penetração sendo, não por muita diferença entre os outros ângulos de trabalho, a pior condição.
12. A dureza nas soldas a 10 m é maior nas feitas como ângulo de chapa a 70°, e a menor dureza ocorre nas feitas com o ângulo de chapa 10°. Isso talvez seja porque a bolha fica mais tempo sobre o cordão nas soldas com ângulo de chapa a 10°, impedindo o contacto da água o que permite um resfriamento mais lento.
13. A microestrutura predominante na Zona Fundida é Ferrítica.

## **CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

1. Uso de outros eletrodos tais como o E7018, oxirutilico desenvolvido pela ESAB (WW70) entre outros.
2. Realizar soldas planas, verticais e sobre cabeça com parâmetros homologados como o ângulo de trabalho, profundidade, corrente, tipo de eletrodo. Com estes resultados comparar a média de porosidade, localização de porosidade, dureza e tamanho de cordão de solda. O dispositivo desenvolvido neste trabalho permite realizar as soldas em todas as posições.
3. Realizar soldas uma sobre a outra (técnica de refusão) com finalidade de comparar com resultados obtidos pela mesma técnica na horizontal.
4. Determinar hidrogênio difusível nas três posições de soldagem e em profundidades de 0,5, 10 e 20 metros.

## RERERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABSON, D. J., COOPER, M. J. (1996). Wet Underwater Welding Trails With Commercial Manual Metal Arc Electrodes. *OMAE - Volume III, Materials Engineering*, (pp. 113 - 123).
- ANDO, S. A. (1983). Study on the Metallurgical Properties of Steel Welds with Underwater Gravity Welding. *Proceedings of the international Conference*. Trondheim, Norway: IIW.
- ANDRADE, L., DIAS, W., RIBEIRO, L. (2010). Efeito do Teor de Carbono do Metal de Base e da Alma do Eletrodo Revestido Sobre a Porosidade em Soldas Molhadas. *Soldagem Insp.*, 156-164.
- ANDRADE, L. G., DIAS, W., PESSOA, E. (2008). Comparação entre a Soldagem Subaquática Molhada na Posição Vertical e na Posição Plana. *V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*. Salvador - Bahia.
- API. (1999). Welding of Pipeline and Related Facilities. In: API, *API Standard 1104*. Washington DC.
- AWS. (1999). *AWS D3.6:1999 Specification for Underwater Welding*. Miami Fl: AWS.
- BRACARENSE, A. (2010). Estudo comparativo dos eletrodos comerciais para soldagem subaquática molhada. *Soldagem e Inspeção*, 325-335.
- BRACARENSE, A., PESSOA, E., DOS SANTOS, V. (2009). Influencia de la composicion física de la capa de barniz impermeabilizante de electrodos rútilicos sobre la porosidad en la soldadura subacuática mojada. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 51-62.
- BROWN, & MASUBUCHI. (1975). Fundamental Research on Under Water Welding. *Welding Journal*, Vol. 54, No. 6.
- BROWN, A. J. (1972). Fundamental Study of Underwater Welding. *4th Annual Offshore Technology Conference*.
- Carvalho, S. d. (1987). Instrução para classificação dos constituintes microestruturais do metal de solda dos aços ferríticos, utilizando-se microscopia ótica. *ABS*, 01-18.
- COTTRELL, C. L. (1984). Hardness Equivalent May Lead to a More Critical Measure of Weldability. *Metal Construction*.
- DADIAN, M. S. (1972). Fundamental Study of Underwater Welding. *4th Annual Offshore Technology Conference*.

- Ginzburg, V. B., Ballas, R. (2000). *Flat rolling fundamentals*. New York: Marcel Dekker.
- GOOCH, T. G. (1983). *Properties of Underwater Welds, Part 1 Procedural Trials and Part 2 Mechanical Properties*. Metal Construction.
- GRUBBS, C. E. (1998). Underwater Welding: seeking high quality at greater depth. *Welding Journal*.
- IBARRA, S., GRUBBS, C. (1994). State of the Art and practice of Underwater Wet Welding of Steel. *International Workshop on Underwater Welding of Marine Structures*, (pp. 49-67). New Orleans, Louisiana.
- IBARRA, S., GRUBBS, C. (1988). Metallurgical Aspects of Underwater Welding. *Welding Journal of Metals*, 8-19.
- IBARRA, S., GRUBBS, C., OLSON, D. (1987). The Nature of Reactions in Underwater Welding. *19th. Offshore Technology Conference OTC*, 65-77.
- ŁABANOWSKI, J. F. (2008). UNDERWATER WELDING – A REVIEW. *ADVANCES IN MATERIALS SCIENCE Vol. 8, No. 3(17)*, 11-22.
- LANDES, J. D. (1977). Recent development in J<sub>1c</sub> testing. In: ASTM, *Development in Fracture Mechanics Test Methods* (pp. 57-81).
- LIU, S. P. (1994). Welding Consumables and Weldability. *International Workshop on Underwater Welding of Marine Structures*, (pp. 321-350). Louisiana, USA.
- MILLS, K. K. (1990). Factors Affecting Variable Weld Penetration. *International Materials Reviews*, 185 - 216.
- MISHLER, H. W. (1970). Underwater Joining and Cutting - Present and Future. *Offshore Technology Conference*, 235-245.
- OLSON, D. L. (1985). Underwater Welding Metallurgy. *Underwater Welding Workshop*. Golden, Colorado.
- OLSON, D. L. (1994). Pyrometallurgy and Physical Metallurgy of Underwater Wet Welds. *Conf. Proc. on Welding Technology in Action*. Melbourne, Australia.
- PAYÃO, J. C. (Setembro 2003). Reações Metalúrgicas na Soldagem Subaquática Molhada. *Soldagem e Inspeção*, 94-102.
- PEREZ, F. (2007). *The mechanism of Porosity Formation in Underwater Steel using SMAW process*. Golden, Colorado, USA: Colorado School of Mines, Thesis.
- PESSOA, E. (2004). Study of Re-Melt tempered bead and polarity effects on porosity in the underwater freshwater wet welds. *23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Vancouver, Canada.

- PESSOA, E. (2003). Study of Porosity Location in Underwater Fresh Water Wet Welds. *Proceedings of OMAE03*. June 8-13, Cancun, México.
- PESSOA, E. (2006). Porosity Variation Along Multipass Underwater Wet Welds and its Influence on Mechanical Properties. *Elsevier*.
- PESSOA, E. Estudo da Variação da Porosidade ao Longo do Cordão de Soldas Subaquáticas Molhadas. *Associação Brasileira de Soldagem*. (13 a 15 de Setembro de 2004), Rio de Janeiro - RJ.
- PESSOA, E. C. (2004). *Study of Porosity Variation Along Underwater Wet Welds*. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: Thesis. Universidade Federal de Minas Gerais.
- POPE. (1995). Solidification of Underwater wet Welds. *OMAE*, 517-521.
- POPE, A. M. (1995). *Oxygen and Hydrogen Control in Shielded Metal Underwater Wet Welding*. Golden, Colorado, USA: Colorado School of Mines.
- PROBST, H. (2002). Kompendium der Schweißtechnik. *DVS-Verlag*, 91-108.
- PUCHOL, R. Q. (2009). Consideraciones Termodinámicas Entre la Formación de Poros y la Presión Hidrostática Durante la Soldadura Subacuática Mojada. *Soldagem Insp.*, 161-169.
- SANTOS, V. R. (2010). Evaluation and development of electrodes for wet welding of structural ship steels. *Proceedings of the ASME 2010 29th International conference on ocean, offshore and arctic engineering*, (pp. 1-10). Shanghai, China.
- SILVA, E. A. (1971). Shielded Metal Arc Welding Underwater With Iron Powdered Electrodes. *Welding Journal*, 50 (6), 406-415.
- SILVA, W. C. (2009). Effect of Electrode Core Rod and Base Metal Carbon Content in Underwater Wet Weld Morphology. *IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica e Industrial*. Brasil.
- SUGA, Y. H. (1986). On Formation of Porosity in Underwater Weld Metal. *Japan Welding Society*, 58-64.
- TEBECHER. (19 de 11 de 2012). *Aços Inoxidáveis*. Fonte: [http://www.pipesystem.com.br/Artigos\\_tecnicos/Aço\\_Inox/body\\_aço\\_inox.html](http://www.pipesystem.com.br/Artigos_tecnicos/Aço_Inox/body_aço_inox.html)
- TREVISAN, R. E. (1990). The fundamentals of Welding Pore Formation. *Elsevier Science Publishers*, 79-115.
- TSAI, C. L. (1977). Interpretative Report on Underwater Welding. *Welding research council*.
- TSAI, C. L. (1979). Mechanisms of Rapid Cooling and Their Design Considerations in Underwater Welding. Houston, Texas: OCT 3469. 973-980.

WATSON, P. D. (1994). Fitness for service Design Application for Underwater Wet Welds. *International Workshop on Underwater Welding of Marine Structures*, (pp. 2010-236). Louisiana, USA.

YA, K. V. (2000). *Technologies of underwater wet welding and cutting*. Kiev, Ukraine: Paton Electric Welding Institute.