

Giovani Miguel Milanezi

RECUPERAÇÃO DAS SEDES DE VÁLVULAS DE CABEÇOTES DE
CONJUNTO DE FORÇA DE MOTORES DIESEL 7FDL

Belo Horizonte

Universidade Federal de Minas Gerais

2016

Giovani Miguel Milanezi

RECUPERAÇÃO DAS SEDES DE VÁLVULAS DE CABEÇOTES DE CONJUNTO DE FORÇA DE MOTORES DIESEL 7FDL

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de pós-graduação da Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Soldagem.

Professor orientador: Dr. Alexandre Queiroz Bracarense. Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte

Universidade Federal de Minas Gerais

2016

AGRADECIMENTOS

Deixo meu agradecimento em primeiro lugar a Deus por me abençoar por tantos anos com a companhia de pessoas maravilhosas, minha família.

Agradeço aos meus pais, João Miguel Milanezi e Maria da Glória Milanezi, por toda a dedicação, paciência e amor que possuem por mim. Vocês são, sem dúvida, a razão principal para escrever mais este trabalho.

Agradeço também a minha namorada, Gabriela, pela paciência e pelos fins de semanas que necessitei para redigir este trabalho.

Agradeço aos colegas da MRS Logística por todo o apoio e horas despendidas no projeto: Antônio Hostalácio, Carla Salomé, Douglas Paiva, Eloir, Fernando Paim, Glayson Ramos, Hygor Leonard, Jorge Rodrigues, Jansen Rodrigues, Luciano Gaudêncio, Marcelus Galho, Marcus Fernandes, Marcus Vinicius de Almeida, Maycon Bruno, Olegário Dias e Otamiro Fernandes.

Agradeço a ESAB por todo o suporte técnico prestado, em especial ao Hugo Reis e ao Matheus Albertoni.

Por último e não menos importante deixo meu sincero agradecimento ao professor Alexandre Queiroz Bracarense, responsável pelo direcionamento deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho é voltado para o desenvolvimento de um processo de reparação das sedes de válvulas dos cabeçotes de motor diesel 7FDL. O trabalho consiste na identificação do material base do cabeçote e do material da sede de válvula e a partir daí será proposto um novo material de deposição para restaurar as tolerâncias dimensionais do cabeçote e com isso se ter um novo ciclo de trabalho.

Palavras chave: AISI410, Cabeçote 7FDL e 410NiMo.

ABSTRACT

This work is focused on the development of a repair process for the valve seats of the 7FDL diesel engine heads. The work consists in the identification of the base material of the valve head and of the material of the valve seat and from there a new deposition material will be proposed to restore the dimensional tolerances of the head and with that a new life cycle is obtained.

Keywords: AISI410, 7FDL and 410NiMo Head.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vista em corte de um conjunto de força 7 FDL	13
Figura 2 - Vista superior de um cabeçote de motor 7FDL	14
Figura 3 - Soldagem GMAW	15
Figura 4 - Equipamentos processo GMAW	16
Figura 5 - Classificação A/SI de aços inoxidáveis.....	26
Figura 6 - Curva tensão residual x deformação para aço AISI410.....	29
Figura 7 - Temp. de transição do aço inox.410. Ensaio de Charpy V:A-material revenido a 790°C;dureza final 95HRB. B-material revenido a 565°C;dureza final 24HRC. C-material revenido a 595°C. dureza final 30HRC	32
Figura 8 - Diagrama de Schaeffler.....	34
Figura 9 - Principal mecanismo de desgaste do cabeçote 7FDL	37
Figura 10 - Cabeçote de motor diesel 7FDL seccionado para análise	38
Figura 11 - Detalhe da região da sede da válvula seccionada ao meio.....	39
Figura 12 - Vista em corte do cabeçote do motor diesel 7FDL.....	40
Figura 13 - Cordão de solda na amostra 1 (análise nº 1).	41
Figura 14 - Cordão de solda na amostra 2 (análise nº 1).	42
Figura 15 - Cordão de solda na amostra 3 (análise nº 1).	43
Figura 16 - Mosaico da Amostra 1. Destaque para microestrutura do cordão e (b) da região limite entre o metal de solda e a ZTA (análise nº 1).....	44
Figura 17 - Mosaico da Amostra 2. Destaque para microestrutura do cordão e (b) da região limite entre o metal de solda e a ZTA (análise nº 1).....	45
Figura 18 - Mosaico da Amostra 3. Destaque para microestrutura do cordão e (b) da região limite entre o metal de solda e a ZTA (análise nº 1).....	45
Figura 19 - Diagrama de Schaeffler para os consumíveis inoxidáveis 410 e 410NiMo.	51
Figura 20- Diagrama de Schaeffler previsto para o metal de fundido (sede de válvula).	52
Figura 21 - Vista superior do cabeçote após enchimento com OK AutoRod 410NiMo ESAB (teste nº 1).....	55
Figura 22 - Teste de líquido penetrante no cabeçote após enchimento com OK AutoRod 410NiMo ESAB (teste nº 1).....	56

Figura 23 - Análise micrográfica óptica. Amostra MIB-16-0358 (sede A) e perfil de microdureza Vickers -A é o perfil vertical e B é o perfil horizontal (teste nº2).....	59
Figura 24 - Análise micrográfica óptica. Amostra MIB-16-0359 (sede B) e perfil de microdureza Vickers -A é o perfil vertical e B é o perfil horizontal (teste nº2).....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aços inoxidáveis duplex.	24
Tabela 2 - Alguns aços inoxidáveis endurecidos por precipitação.....	25
Tabela 3 - Composição química do aço inoxidável 410.....	27
Tabela 4 - Temperaturas máximas de trabalho de aços inoxidável exposto a atmosfera	30
Tabela 5 - Propriedades mecânicas mínimas do aço inoxidável 410.....	31
Tabela 6 - Propriedades físicas do aço AISI410	31
Tabela 7 - Temperatura de recozimento para aço inoxidável 410	33
Tabela 8 - Condições de soldagem para resistência a corrosão do aço inoxidável 410	33
Tabela 9 - Resultados de Dureza (análise nº 1).....	46
Tabela 10 - Resultado análise química do material de base do cabeçote (análise nº1).....	46
Tabela 11 - Resultado análise química do material da sede de válvula do cabeçote (análise nº1).....	47
Tabela 12 - Composição química dos consumíveis 410 e 410NiMo.	48
Tabela 13 - Propriedades mecânicas de aços inoxidáveis martensíticos.....	49
Tabela 14 - Cr_{eq} e Ni_{eq} previsto para o metal fundido (sede da válvula).	52
Tabela 15 - Parâmetros utilizados na soldagem do cabeçote serial EG08080731 (teste nº 1).....	53
Tabela 16 - Composição química e dureza das sedes reparadas com OK Autorod 410NiMo(teste nº1).....	54
Tabela 17 - Parâmetros utilizados na soldagem do cabeçote serial EG98110665 (teste nº 2).....	56
Tabela 18 - Análise química do material de base do cabeçote serial EG98110665 (teste nº 2).....	57
Tabela 19 - Composição química das sedes reparadas com OK Autorod 410NiMo (teste nº2).....	57
Tabela 20 - Dureza das sedes reparadas com OK Autorod 410NiMo e do material de base do cabeçote (teste nº2).	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Aplicabilidade dos processos de Soldagem	17
Quadro 2 - Alguns tipos de aços inoxidáveis martensíticos.	21
Quadro 3 - Alguns tipos de aços inoxidáveis ferríticos.....	22
Quadro 4 - Alguns tipos de aços inoxidáveis austeníticos.	23

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO.....	11
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 – Processo de soldagem GMAW	15
2.2 – Aço Inoxidável	19
2.2.1 - Aço inoxidável 410	26
2.3 – Diagrama de Schaeffler	33
3 – METODOLOGIA.....	36
3.1 - Análise de Material.....	36
4- RESULTADOS	37
4.1 – Análises das condições de trabalho e do dimensional cabeçote.....	37
4.2 – Análise de material	40
4.3 – Proposta de novo consumível	47
5- CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	62

1 – INTRODUÇÃO

A MRS Logística é uma operadora ferroviária que administra uma malha de 1643km dividida entre os estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo. O transporte de cerca de 30% de toda a carga ferroviária no país é realizada pela MRS. A companhia foi criada em 1996, quando o governo transferiu à iniciativa privada a gestão do sistema ferroviário nacional. A malha conecta regiões produtoras de commodities minerais e agrícolas e alguns dos principais parques industriais do país aos maiores portos da região Sudeste, o que confere à operação uma importância econômica diferenciada. Além do transporte de cargas como minérios, produtos siderúrgicos acabados, cimento, bauxita, produtos agrícolas e containers, entre outros, a MRS oferece soluções logísticas mais amplas, incluindo o planejamento e o desenvolvimento de soluções multimodais (que se valem de mais de um meio de transporte), além de serviços ferroviários customizados. A companhia tem hoje indicadores comparáveis às ferrovias mais eficientes e seguras, em quesitos como eficiência energética, *transit time*, disponibilidade e confiabilidade de ativos, segurança e produtividade, e se destaca pelo uso intensivo de tecnologia e de uma cultura de inovação.

A MRS possui atualmente cerca de 700 locomotivas para realizar o transporte de carga e cerca de 90% destas locomotivas possuem o motor 7FDL de 12 ou 16 cilindros, totalizando mais de 10.000 cabeçotes de motor diesel em operação. A manutenção preventiva das locomotivas é realizada num período baseado no consumo de Diesel de cada frota e o tempo varia de acordo com a utilização de cada frota, a manutenção corretiva pode ser realizada em qualquer momento. Com a recuperação das sedes de válvulas de um cabeçote, este poderá iniciar um novo ciclo de trabalho, reduzindo a necessidade de compra de novos componentes. Um outro fator motivador deste trabalho é a baixa qualidade técnica dos fornecedores que realizam este tipo de reparo no Brasil, observa-se uma ampla variedade na aplicação de consumíveis e, em alguns casos, estes não possuem características teóricas necessárias à aplicação do componente.

Na Figura 1 tem-se a vista em corte de um conjunto de força de motor 7FDL, em destaque de vermelho vemos o cabeçote citado anteriormente. O cabeçote é uma

peça fundida (diversas partes) e possui como material base um aço de baixa liga e um aço inoxidável na região da sede das válvulas. Na Figura 2 verificam-se em destaque as quatro sedes de válvula do cabeçote, duas de exaustão e outras duas de admissão.

O projeto em desenvolvimento consiste em desenvolver um processo interno de recuperação (pré-usinagem, soldagem, pós-usinagem e inspeção final) para o cabeçote. Neste trabalho será estudada somente a parte da definição do consumível e parâmetros de soldagem referente à recuperação das sedes de válvulas, este também é o objetivo deste trabalho.

O trabalho está estruturado em quatro capítulos além da introdução.

O capítulo nº2 faz a revisão bibliográfica dos principais conceitos do processo de soldagem utilizado na reparação das sedes, GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), aborda também as principais características físicas, químicas e estruturais dos aços inoxidáveis e também suas aplicações e recomendações de soldagem.

O capítulo nº 3 aborda a metodologia empregada para identificação do material de base do cabeçote e da sede de válvula, especificando os testes e as análises de laboratório necessárias.

No capítulo nº 4 são apresentadas e comentadas as análises de material realizadas em laboratório. Outro ponto apresentado neste capítulo é a definição de novo consumível de soldagem e o embasamento de sua aplicação através de conceitos citados na revisão bibliográfica do capítulo nº 3 e de testes práticos comentados no capítulo nº 4.

Por último o capítulo nº 5 resume os resultados encontrados no capítulo 4, comentando os pontos de destaque do capítulo anterior (testes práticos, melhores parâmetros de soldagem, defeitos tolerados e entre outros).



Figura 1 - Vista em corte de um conjunto de força 7 FDL

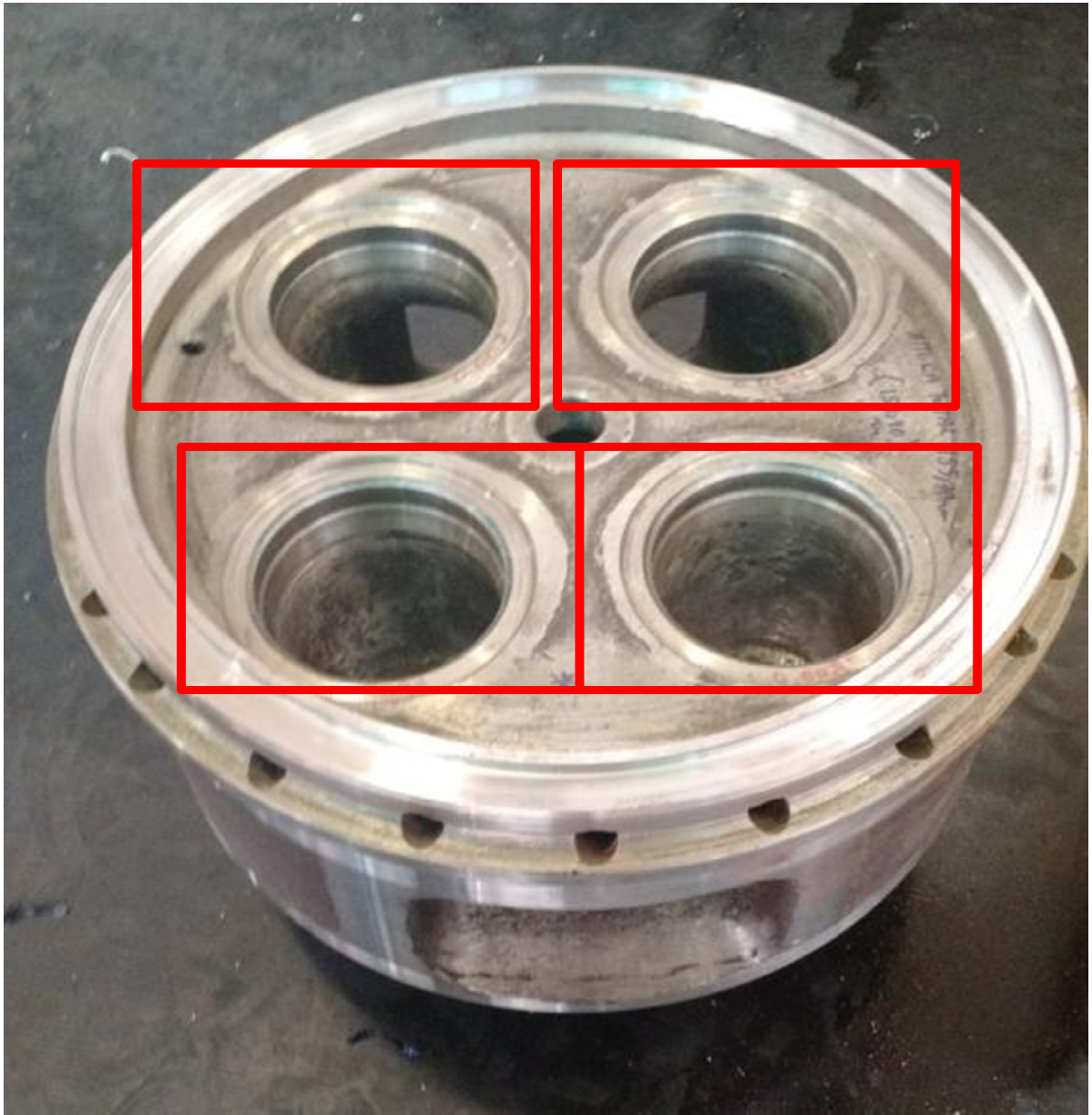


Figura 2 - Vista superior de um cabeçote de motor 7FDL

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Processo de soldagem GMAW

É um processo de soldagem à arco elétrico que através do aquecimento dos metais resulta na fusão do eletrodo consumível e o material base (peça), conforme ilustrado na Figura 3. O processo de soldagem à arco metal-gás (*GMAW – Gas Metal Arc Welding*) é amplamente utilizado na soldagem de manutenção.

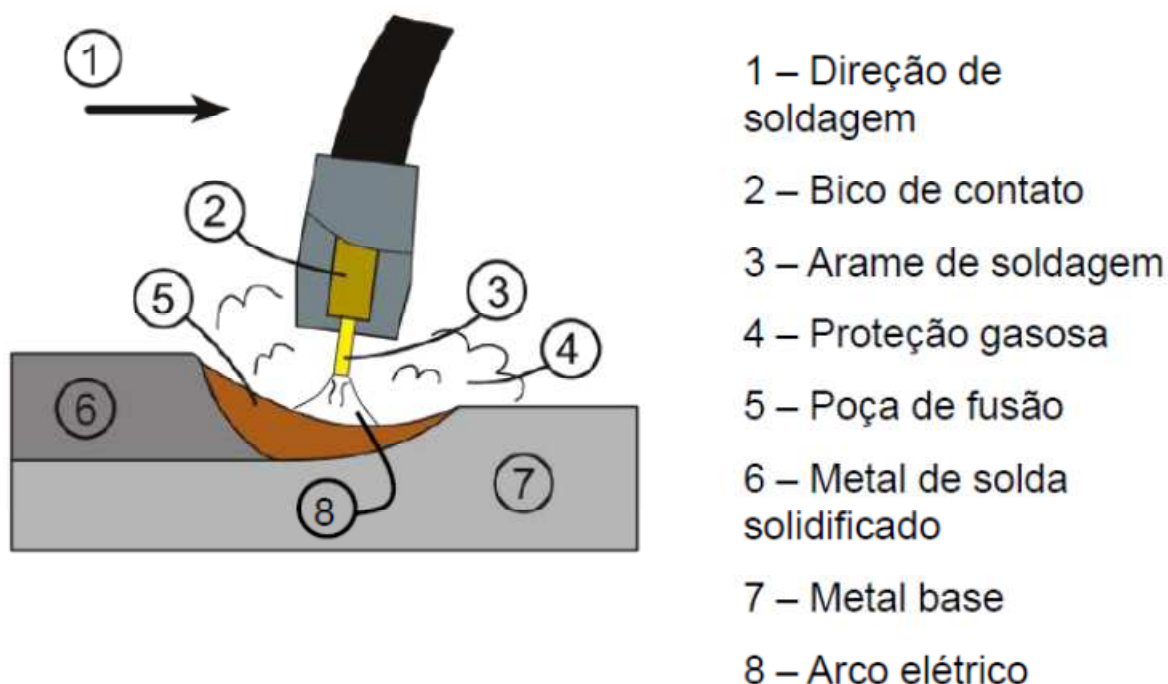


Figura 3 - Soldagem GMAW

Fonte: BRACARENSE, 2015, p. 6.

A proteção do arco e poça de fusão é obtida por um gás ou mistura de gases. Se este gás é inerte (Ar/He), o processo é também chamado MIG (*Metal Inert Gas*). Por outro lado, se o gás for ativo (CO₂ ou misturas Ar/O₂/CO₂), o processo é chamado MAG (*Metal Active Gas*). Gases inertes puros são, em geral, usados na soldagem de metais e ligas não ferrosas, misturas de gases inertes com pequenas quantidades de gases ativos são usadas, em geral, com aços ligados, enquanto que misturas mais ricas em gases ativos ou CO₂ puro são usadas na soldagem de aços carbono. O processo é normalmente operado de forma semi-automática, podendo ser, também, mecanizado ou automatizado. É o processo de soldagem a arco mais usado com robôs industriais. Como trabalha com um (ou mais)

arame(s) contínuo(s), o que permite um alto fator de ocupação, com elevadas densidades de corrente no eletrodo (elevada taxa de deposição) e, assim, tende a apresentar uma elevada produtividade. Estes aspectos têm levado a uma utilização crescente deste processo (e da soldagem com arames tubulares) em países desenvolvidos, onde o decréscimo do número de soldadores e a necessidade de maior produtividade causaram a substituição da soldagem com eletrodos revestidos em várias aplicações. A tabela 5 apresenta as principais vantagens, limitações e aplicações do processo GMAW (MODENESI;VILANI. 2006).

O equipamento para soldagem GMAW é formado por uma fonte de energia, tocha de soldagem, fonte de gás e um cabeçote alimentador de arame. Segundo MODENESI;VILANI (2006), a fonte possui tensão constante regulável entre 15 e 50V e o cabeçote alimentador de arame possui velocidade de alimentação entre 1 e 20m/min. O sistema possui inteligência para regular a corrente de acordo com as variações no comprimento do arco. Geralmente utiliza-se corrente contínua com polaridade reversa (CC+) e durante processos de soldagem de Alumínio utiliza-se corrente alternada (CA) para poder realizar o processo de limpeza catódica.

Na Figura 4 são mostrados os principais equipamentos do processo de soldagem GMAW.

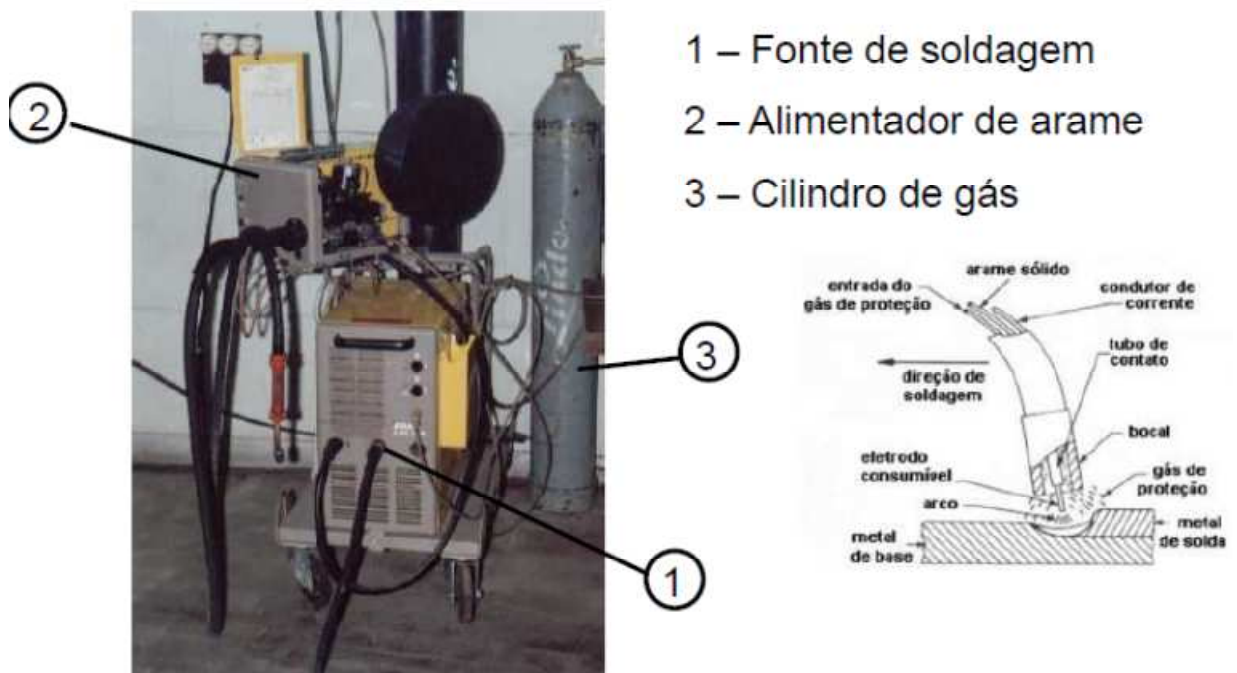


Figura 4 - Equipamentos processo GMAW

Fonte: BRACARENSE, 2015, p.9.

Segundo WEINER (1992) os processos de soldagem podem ser aplicados conforme o Quadro 1.

Quadro 1 - Aplicabilidade dos processos de Soldagem

Materiais e espessuras		Processos de soldagem														
		Eletrodo revestido	Arco submerso	MIG ou MAG	Eletr. tubular	TIG	Plasma	Eletroescória	Resistência	Oxigás	Feixe de elétrons	Laser	Brasagem	Soldagem branca	Difusão	Atrito
Aço-carbono	F	x	x	x		x			x	x	x	x	x			x
	I	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x			x
	M	x	x	x	x				x	x	x	x				x
	G	x	x	x	x			x		x	x	x				x
Aço de baixa liga	F	x	x	x		x			x	x	x	x	x	x	x	x
	I	x	x	x	x	x			x		x	x	x	x	x	x
	M	x	x	x	x					x	x	x	x		x	x
	G	x	x	x	x			x		x	x	x			x	x
Aço inoxidável	F	x	x	x		x			x	x	x	x	x	x	x	x
	I	x	x	x	x	x			x		x	x	x	x	x	x
	M	x	x	x	x	x				x	x	x	x	x	x	x
	G	x	x	x	x			x		x	x	x		x	x	x
Ferro fundido	I	x								x						
	M	x	x	x	x					x		x				
	G	x	x	x	x					x						
Níquel e suas ligas	F	x		x		x	x		x	x	x	x	x	x		x
	I	x	x	x		x	x		x	x	x	x	x			x
	M	x	x	x			x			x	x	x				x
	G	x		x				x		x	x	x				x
Alumínio e suas ligas	F			x		x	x		x		x	x	x	x	x	x
	I			x		x			x		x	x	x	x	x	x
	M			x		x					x	x	x	x	x	x
	G			x				x			x					x
Titânio e suas ligas	F			x		x	x		x		x	x			x	x
	I			x		x	x				x	x			x	x
	M			x		x	x				x	x			x	x
	G			x							x		x		x	x
Cobre e suas ligas	F			x		x	x			x		x	x			x
	I			x			x					x	x			x
	M			x								x				x
	G			x								x				x

Espessuras: F = até 3 mm I = de 3 a 6 mm M = de 6 a 19 mm G = acima de 19 mm

A tocha possui um contato elétrico deslizante (bico de contato), que transmite a corrente elétrica ao arame, orifícios para passagem de gás de proteção, bocal para dirigir o fluxo de gás e interruptor para acionamento do processo. O alimentador de arame é composto basicamente de um motor, sistema de controle da velocidade do motor e rolos para impulsão do arame.

Neste processo de soldagem, mais do que em qualquer outro, a forma como o metal de adição se transfere do eletrodo para a poça de fusão pode ser controlada e determina várias de suas características operacionais. A transferência de metal através do arco se dá, basicamente, por três mecanismos: aerossol (spray), globular e curto-circuito, dependendo de parâmetros operacionais, tais como o nível de corrente, sua polaridade, diâmetro e composição do eletrodo e a composição do gás de proteção. Uma quarta forma de transferência (pulsada) é possível com equipamentos especiais. Na transferência por spray, o metal se transfere como finas gotas sob a ação de forças eletromagnéticas do arco e independentemente da ação da gravidade. Esta forma de transferência ocorre na soldagem com misturas de proteção ricas em argônio e com valores elevados de corrente. Ela é muito estável e livre de respingos. Infelizmente, a necessidade de correntes elevadas torna difícil, ou impossível, a sua aplicação na soldagem fora da posição plana (a poça de fusão tende a ser muito grande e de difícil controle) ou de peças de pequena espessura (excesso de penetração). Na transferência globular, o metal de adição se destaca do eletrodo basicamente por ação de seu peso (gravidade), sendo, portanto, similar a uma torneira gotejando. É típica da soldagem com proteção de CO₂ para tensões mais elevadas e uma ampla faixa de correntes. Na soldagem com misturas ricas em Ar, a transferência globular ocorre com corrente baixa e tensão elevada. Com esta forma de transferência, um elevado nível de respingos e grande flutuação da corrente e tensão de soldagem são comuns e a operação está restrita à posição plana. Na transferência por curto circuito, o eletrodo toca a poça de fusão periodicamente (de 20 a 200 vezes por segundo), ocorrendo a transferência de metal de adição durante estes curtos por ação da tensão superficial e das forças eletromagnéticas. É a forma de transferência mais usada na soldagem de aços (particularmente com proteção de CO₂) fora da posição plana e de peças de pequena espessura (até 6 mm) devido às pequenas correntes de operação e à sua independência da ação da gravidade. Elevado nível de respingos e uma tendência à falta de fusão da junta (principalmente para juntas de grande espessura) são problemas típicos desta forma de operação. A transferência pulsada é conseguida com fontes especiais que impõem uma forma especial à corrente de soldagem, caracterizada por pulsos periódicos de alta corrente. Esta pulsação permite uma transferência spray com valores médios de corrente inferiores aos valores nos quais esta forma de transferência ocorre normalmente. Assim, obtêm-se as vantagens desta transferência com baixos valores de corrente o que permite a sua aplicação na soldagem de juntas de pequena espessura e, também, fora da posição plana. As maiores limitações desta forma de operação são a sua maior complexidade (MODENESI; VILANI. 2006).

O processo GMAW também é conhecido como MIG/MAG. No processo MIG utiliza-se gases que não reagem com o metal soldado, como por exemplo, misturas de CO₂, O₂ ou N₂ e de acordo com BRACARENSE (2015) são utilizados na soldagem de materiais ferrosos. O processo MAG utiliza gases inertes, ou seja, não reagem com o metal soldado e de acordo com BRACARENSE (2015) são utilizados em processos ferrosos e não ferrosos (Cobre, Magnésio, Alumínio e Níquel).

Segundo BRACARENSE (2015), as principais vantagens do processo GMAW são:

- alta produtividade devido à alimentação contínua do arame e alta taxa de deposição;
- alta variabilidade na aplicação em metais e não metais;
- pode ser soldado em todas as posições;

- exige menos habilidade do soldador, devido à semi-automatização do processo e permite realizar cordões mais longos e contínuos;
- quase não é necessário realizar limpeza pós solda;
- é um processo que pode ser robotizado.

BRACARENSE (2015) também menciona que as principais desvantagens do processo GMAW são:

- equipamento mais robusto, mais complexo e mais caro que uma máquina SMAW;
- menos variedade de consumíveis;
- dificuldade de soldar em geometrias com restrição de acesso;
- dificuldade de realizar soldas em campo, devido necessidade de gás de proteção ao soldar;
- processo gera maior radiação térmica que o SAW e SMAW devido à exposição do arco e aos maiores valores de corrente empregados, resultando numa menor resistência do soldador ao processo.

2.2 – Aço Inoxidável

Conforme definição de WASHKO e AGGEN (1993) ligas de aços inoxidáveis são ligas contendo pelo menos 10,5% Cr. Poucas ligas possuem mais de 30% de Cr ou menos de 50% de Fe. A principal característica de uma liga de aço inoxidável é a formação de uma fina camada de óxido de cromo. Este óxido protege o aço do ataque do oxigênio, evitando assim a oxidação da superfície. Outros elementos são comumente adicionados para enobrecer as propriedades do aço inoxidável como Ni, Mo, Cu, Ti, Al, Si, N e S. C é comumente utilizado em teores abaixo de 0,3% e também acima de 1% em aços martensíticos.

A seleção de um aço inoxidável é baseada no grau de resistência a corrosão necessária, características de fabricação, disponibilidade, propriedades mecânicas numa faixa específica de temperatura e, obviamente, custo. Entretanto propriedades mecânicas e resistência à corrosão são as propriedades mais importantes para se selecionar um aço inoxidável.

A ASM classificou os aços inoxidáveis nas seguintes categorias: martensíticos, ferríticos, austeníticos, duplex (ferrítico e austenítico) e endurecidos precipitados.

Martensíticos: são basicamente ligas de Cr e C que possuem microestrutura cristalina (martensítica) de TCC (tetragonal de corpo centrado). São ferromagnéticos, endurecidos por tratamento térmico e, obviamente, resistentes à corrosão. O percentual de Cr varia entre 10,5% e 18% e o carbono não passa de 1,2%. O Cr e o C devem ser balanceados para manter a estrutura martensítica após o tratamento de endurecimento. Elementos como Ni, Si, W e Va podem ser adicionados para modificar a resposta à tempera após endurecimento. Pequenas quantidades de Ni também podem ser adicionadas para aumentar a resistência à corrosão. Enxofre pode ser adicionado para melhorar a usinabilidade.

Estes aços são especificados quando a aplicação requer elevada resistência à tração, à fluência e à fadiga, combinadas com requisitos moderados de resistência à corrosão e utilizações até 650°C. Entre as suas aplicações estão turbinas a vapor, motores a jato e turbinas a gás. Alguns destes aços encontram aplicações, também, como tubulações de vapor, reaquecedores de geradores a vapor e tubulações superaquecidas utilizadas em refinarias de combustíveis fósseis, cutelaria, peças de válvulas, engrenagens de eixos, cilindros laminadores instrumentos cirúrgicos, molas, cames e esferas de rolamentos (CARUSO. 2001).

O Quadro 2 mostra alguns aços inoxidáveis martensíticos.

Quadro 2 - Alguns tipos de aços inoxidáveis martensíticos.

Tipo AISI	C	Cr	Ni	Outros Elementos	Propriedades gerais e aplicações típicas
403	0,15 max	11,5-13,0	-	Si : 0,50 max Mn : 1,00 max	Tipo turbina: para lâminas forjadas ou usinadas de turbina e compressor
410	0,15 max	11,5-13,5	-	Si : 1,00 max Mn : 1,00 max	Tipo turbina: aço inox. de baixo custo para aplicações gerais, na forma de peças temperadas ou chapas e tiras recozidas
414	0,15 max	11,5-13,5	1,25-2,50	Si : 1,00 max Mn : 1,00 max	Tipo turbina: para molas, lâminas de facas, etc.
431	0,20 max	15,0-17,0	1,25-2,50	Si : 1,00 max	Tipo turbina: melhores propriedades mecânicas e resistência à corrosão dentre os tipos martensíticos ou endurecíveis
420	0,15 min	12,0-14,0	-	Si : 1,00 max Mn : 1,00 max	Tipo cutelaria: instrumentos cirúrgicos, mancais de esfera, válvulas, etc.
440A	0,60-0,75	16,0-18,0	-	Mo : 0,75 max Si : 1,00 max Mn : 1,00 max	Tipo cutelaria e resistente ao desgaste: dureza elevada; para cutelaria, instrumentos cirúrgicos, válvulas, mancais anti-fricção, etc.

Fonte: MODENESI, 2015, p. 33.

Ferríticos: são essencialmente estruturas à base de Cr com microestrutura cristalina CCC. O teor de Cr varia de 10,5% a 30%. Alguns aços inoxidáveis ferríticos podem conter Mo, Si, Al, Ti e Ni para enobrecer determinadas características do aço. Enxofre pode ser adicionado para melhorar a usinabilidade. São ferromagnéticos, possuem boa ductibilidade, porém as propriedades mecânicas a altas temperaturas são relativamente inferiores quando comparadas aos austeníticos. A dureza pode ser um fator limitador quando for solicitado a baixas temperaturas.

Suas várias classes encontram aplicações em sistemas de exaustão de automóveis, recipientes de alimentos, trocadores de calor e em tubulações contendo soluções com cloretos e água do mar (CARUSO. 2001).

O Quadro 3 mostra alguns tipos de aços inoxidáveis ferríticos.

Quadro 3 - Alguns tipos de aços inoxidáveis ferríticos

Tipo AISI	Composição (%peso)			Propriedades gerais e aplicações típicas
	C	Cr	Outros elementos	
405	0,08	11,5-13,5	Al : 0,10 a 0,30	Não endurecível devido à presença de Al; para tubos, caldeiras, recipientes para indústria petrolífera, etc
409	0,08	10,5-11,75	Ti : 6xC min.	Não endurecível devido à presença de Ti, para sistema de exaustão de automóveis.
430	0,12	14,0-18,0	-	Tipo mais comum deste grupo. Fácil conformação. Muito usado em equip. para a indústria química, equip. para restaurantes, cozinhas, adornos de automóveis, decoração, peças de fornos, etc.
442	0,20	18,0-23,0	-	Para serviço a T↑, quando não se exige facilidade de fabricação, para partes de fornos, etc.
446	0,20	23,0-27,0	N : 0,25 max.	Melhor resistência à corrosão e à oxidação até 1150°C; para peças de fornos, queimadores, radiadores, etc.

Fonte: MODENESI, 2015, p.46.

Austeníticos: possuem estrutura CFC (cúbica face centrada). Esta estrutura é obtida utilizando elementos gamagênicos como Ni, Mg e N. São paramagnéticos e também são endurecidos por trabalho a frio. Possuem excelentes propriedades criogênicas e boas propriedades a altas temperaturas. O teor de Cr varia entre 16 e 26%, Ni acima de 35% e Mg acima de 15. A série 2XX contém N entre 4 e 15%, Mn e Ni acima de 7%. A série 3XX contém grandes percentuais de Ni e Mn acima de 2%. Mb, Cu, Si, Al, Ti e Ni podem ser adicionados para adquirir maior resistência a corrosão. S pode ser adicionado para melhorar a usinabilidade. No Quadro 4 verificam-se alguns tipos de aços inoxidáveis austeníticos.

Podem, em função dos elementos de liga presentes na sua composição, resistir a corrosão atmosférica, em várias soluções aquosas, na presença de alimentos, em ácidos oxidantes (como o nítrico), fosfóricos e acéticos, em soluções diluídas contendo cloretos e em ácidos sulfurosos (CARUSO. 2001).

Quadro 4 - Alguns tipos de aços inoxidáveis austeníticos.

Tipo AISI	C	Cr	Ni	Outros Elementos	Propriedades gerais e aplicações típicas
301	0,15	16,0-18,0	6,0-8,0	Mn : 2,0 max Si - 1,0 max	Aplicação geral; boa trabalhabilidade; ornamentação, utensílios domésticos, fins estruturais; ind. química, naval, alimentícia, transportes, etc.
304	0,08	18,0-20,0	8,0-11,0	Mn : 2,0 max Si : 1,0 max	Tipo 18:8 de C mais baixo, soldável com menor perigo de corrosão intergranular, mesmas aplicações dos tipos 301.
308	0,08	19,0-21,0	10,0-12,0	Mn : 2,0 max Si : 1,0 max	Maior resistência à corrosão que o 18:8; para eletrodos de solda, entre outras aplicações
309	0,20	22,0-24,0	12,0-15,0	Mn : 2,0 max Si : 1,0 max	Boa resistência à oxidação e mecânica a altas temperaturas; para equipamentos da indústria química, peças de fornos, estufas, etc.
310	0,25	24,0-26,0	19,0-22,0	Mn : 2,0 max Si : 1,5 max	Boa estabilidade nas temperaturas de soldagem; eletrodos de solda, equipamentos para indústria química, peças de fornos, estufas; resiste à oxidação até temperaturas da ordem de 1100°C
316	0,08	16,0-18,0	10,0-14,0	Mo : 2,0 a 3,0 Mn : 2,0 max Si : 1,0 max	Melhor resistência à corrosão química; para equipamentos da indústria química, de papel, etc.

Fonte: MODENESI, 2015, p. 58.

Duplex: sua estrutura é formada por aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos. O percentual de cada tipo de aço varia de acordo com o tratamento térmico e a composição química. A maior parte das ligas contém teores aproximados de cada tipo. Os principais elementos são Cr e Ni, mas N, Mo, Cu, Si e W são adicionados para controlar o balanceamento da estrutura e adicionar algumas características de resistência à corrosão. A resistência à corrosão dos aços duplex é similar aos aços austeníticos, porém possuem algumas propriedades superiores aos aços austeníticos como tensão de escoamento e tensão de ruptura. A dureza de um aço duplex é intermediária entre os aços austeníticos e ferríticos.

Graças a sua elevada resistência mecânica, os aços inoxidáveis duplex podem ser utilizados em menores espessuras. Sua desvantagem é que não pode ser utilizado em temperaturas acima de 300°C, sob a pena de perder algumas de suas características mecânicas, sobretudo a tenacidade. É bastante utilizado nas indústrias de gás, petróleo, petroquímica, polpa e papel, principalmente na presença de meios contendo aquosos contendo cloretos (CARUSO. 2001).

A Tabela 1 mostra alguns tipos de aços inoxidáveis duplex.

Tabela 1 - Aços inoxidáveis duplex.

Grade	UNS	EN	C	Cr	Ni	Mo	Mn	N	Cu	W
First generation DSSs										
329	S32900	1.4460	0.08	23.0-28.0	2.5-5.0	1.0-2.0	1.0	not-defined	23.0-28.0	2.5-5.0
3RE60	S31500	1.4417	0.03	18.0-19.0	4.3-5.2	2.5-3.0	1.2-2.0	0.05-0.10	18.0-19.0	4.3-5.2
UR50	S32404		0.04	20.5-22.5	5.5-8.5	2.0-3.0	2.0	–	1.00-2.00	–
Modern DSSs										
2304	S32304	1.4362	0.03	21.5-24.5	3.0-5.5	0.0-0.6	2.5	0.05-0.20	–	–
2205	S31803	1.4462	0.03	21.0-23.0	4.5-6.5	2.5-3.5	2.0	0.08-0.20	–	–
2205	S32205	1.4462	0.03	22.0-23.0	4.5-6.5	3.0-3.5	2.0	0.14-0.20	–	–
DP-3	S31260		0.03	24.0-26.0	5.5-7.5	5.5-7.5	1.0	0.10-0.30	0.20-0.80	0.10-0.50
UR52N	S32520	1.4507	0.03	24.0-26.0	5.5-8.0	3.0-5.0	1.5	0.20-0.35	0.50-3.00	–
255	S32550	1.4507	0.04	24.0-27.0	4.5-6.5	2.9-3.9	1.5	0.10-0.25	1.50-2.50	–
DP-3W	S39274		0.03	24.0-26.0	6.8-8.0	2.5-3.5	1.0	0.24-0.32	0.20-0.80	1.50-2.50
2507	S32750	1.4410	0.03	24.0-26.0	6.0-8.0	3.0-5.0	1.2	0.24-0.32	0.50	–
Zeron100	S32760	1.4501	0.03	24.0-26.0	6.0-8.0	3.0-4.0	1.0	0.20-0.30	0.50-1.00	0.50-1.00

Fonte: MODENESI, 2015, p. 67.

Endurecidos precipitados: são ligas de Cr-Ni contendo precipitações de elementos endurecedores como Cu, Al e Ti. Estas precipitações possuem microestrutura martensítica ou austenítica após o recozimento. Aqueles com características austeníticas são frequentemente transformados em martensita após tratamento térmico. Este tipo de aço possui propriedades similares aos aços martensíticos, porém com teores de C% menores.

Possuem boa resistência mecânica, tenacidade e ductibilidade. Sua resistência à corrosão é de moderada a boa. Suas características lhe garantem aplicação nas indústrias aeroespacial e de alta tecnologia (CARUSO. 2001).

A Tabela 2 mostra alguns tipos de aços inoxidáveis endurecidos por precipitação.

Tabela 2 - Alguns aços inoxidáveis endurecidos por precipitação.

Martensíticos

Tipo	UNS	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Al	Outros
17-4PH	S17400	0,04	0,30	0,60	16,0	4,2	---	---	Cu3,4;Nb0,25
450	S45000	0,03	0,25	0,25	15,0	6,0	0,8	---	Cu1,5;0,3Nb
PH13-8Mo	S13800	0,04	0,03	0,03	12,7	8,2	2,2	1,1	---

Semiausteníticos

Tipo	UNS	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Al	Outros
PH15-7Mo	S15700	0,07	0,50	0,30	15,2	7,1	2,2	1,2	---
AM350	S35000	0,10	0,75	0,35	16,5	4,25	2,75	---	---

Austeníticos

Tipo	UNS	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Al	Outros
A286	S66286	0,05	0,50	0,50	14,75	25,0	1,3	0,15	V0,3;Ti2,15;B0,005
JBK-75	---	0,015	0,05	0,02	14,5	29,5	1,25	0,25	V0,27;Ti2,15;B0,0015

Fonte: MODENESI, 2015, p. 70.

A classificação dos aços inoxidáveis de acordo com *AISI (American Iron and Steel Institute)* é mostrada na Figura 5.

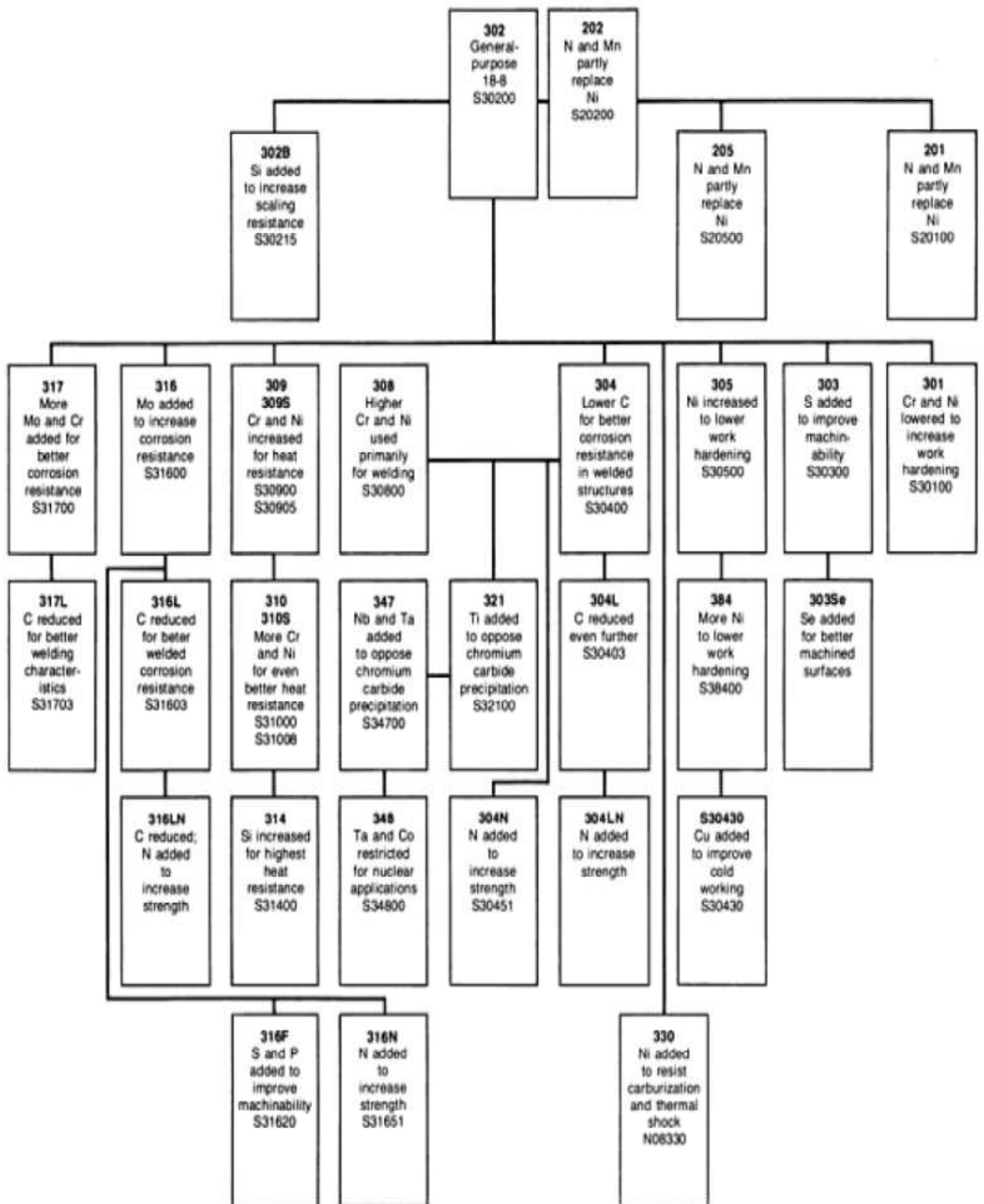


Figura 5 - Classificação AISI de aços inoxidáveis

Fonte: Handbook ASM – Volume 1 – Properties and Selection Iron Steels and High Performance Alloys – 1993, p. 2013.

2.2.1 - Aço inoxidável 410

Aços inoxidáveis são utilizados em aplicações onde elevada resistência a corrosão é necessária, a dureza é uma propriedade importante em aplicações a elevadas temperaturas e também é o fator chave para determinar a escolha do aço inoxidável.

A Tabela 3 mostra a composição química do aço inoxidável 410 de acordo com a ASTM (*American Society for Testing and Materials*), SAE-AISI (*Society Automotive Engineers – American Iron and Steel Institute*) e ACI (*American Concrete Institute*).

Tabela 3 - Composição química do aço inoxidável 410

ACI type	Wrought alloy type ^(a)	ASTM specifications	Most common end-use microstructure	Composition, % ^(b)					
				C	Mn	Si	Cr	Ni	Others ^(c)
CA-15	410	A 743, A 217, A 487	Martensite	0.15	1.00	1.50	11.5-14.0	1.0	0.50Mo ^(d)

Fonte: *Handbook ASM – Volume 1 – Properties and Selection Iron Steels and High Performance Alloys – 1993, p. 2196.*

De acordo com HANDBOOK ASM – Vol. 1 (1993) o aço inoxidável do tipo 410 possui aplicações de uso geral, válvulas, eixos de bombas, parafusos e diversos componentes onde a resistência a corrosão e temperatura de trabalho acima de 540 °C são necessárias.

Um tratamento térmico para este aço consiste em aquecer entre 950°C e 980°C, resfriar em óleo ou ar e revenir. Resfriamento após a laminação a quente e tempera, às vezes, é prejudicial e pode resultar numa estrutura contendo ferrita livre e pode prejudicar as propriedades do material. Trabalho a quente ou a frio após temperar produz tensões residuais que podem ser amenizadas com tratamento térmico em temperaturas de 620°C.

As curvas de tensão residual do aço inoxidável 410 são mostradas na Figura 6. O gráfico superior da Figura 6 representa a tensão residual em aços com diferentes níveis de deformação e expostos a temperatura de 650°C (taxa de aquecimento de 90°C/s) durante determinado período, enquanto o gráfico inferior representa a tensão residual em aços aquecidos, depois de trabalhados, a 815°C (taxa de aquecimento de 105°C/s) durante determinado período. Estas curvas são

extremamente uteis para os casos onde a peça possuir aplicações a elevadas temperaturas.

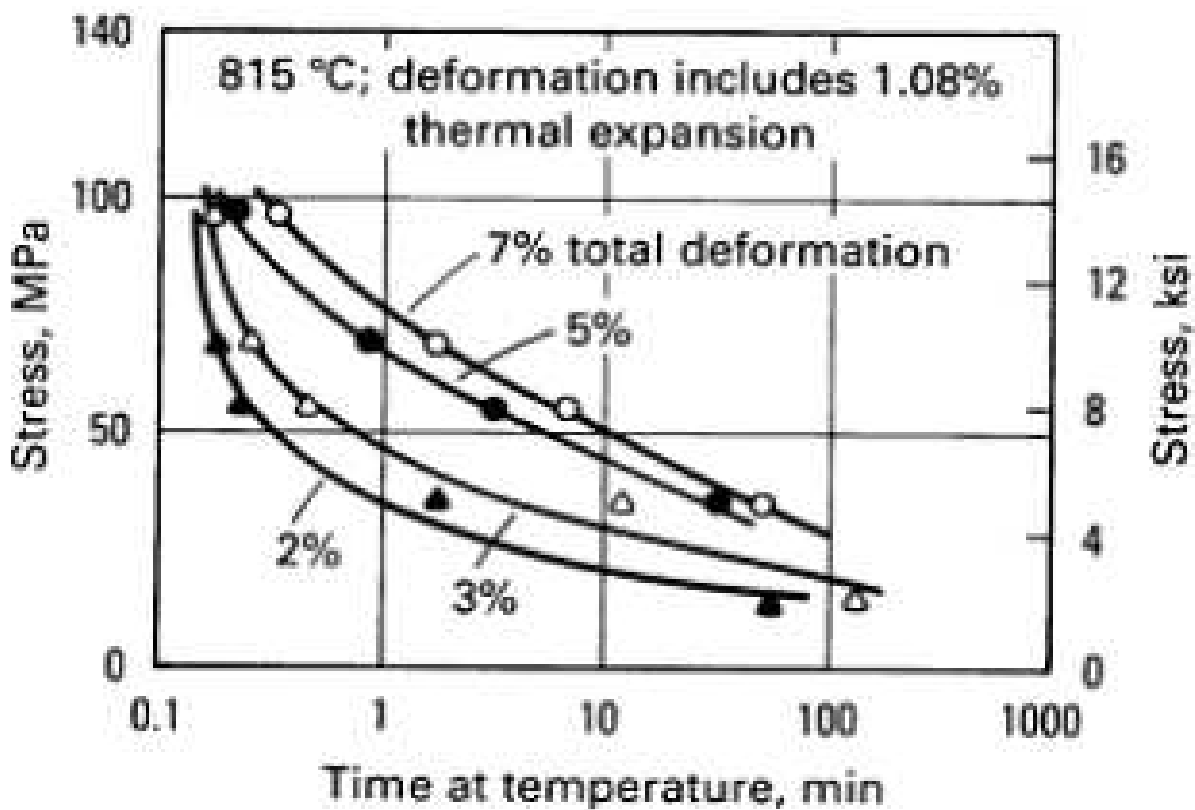
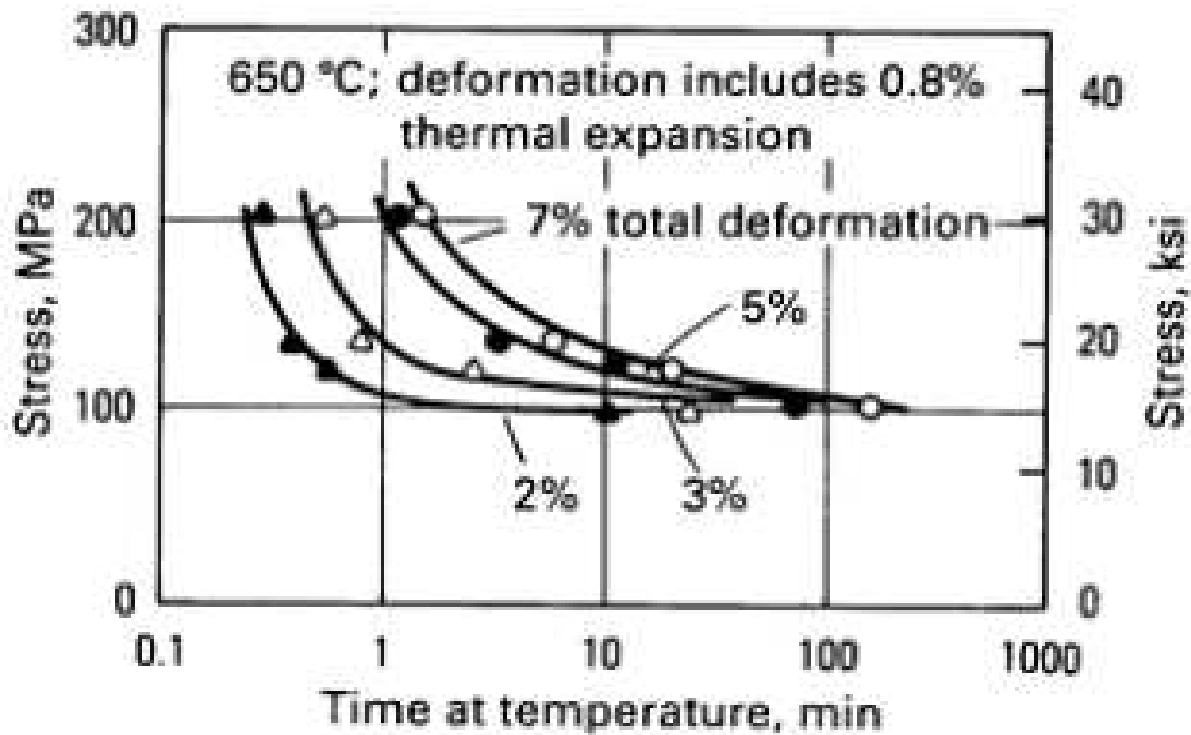


Figura 6 - Curva tensão residual x deformação para aço AISI410.

Fonte: *Handbook ASM – Volume 1 – Properties and Selection Iron Steels and High Performance Alloys* – 1993, p. 2196.

A Tabela 4 mostra as temperaturas máximas de trabalho (contínua e intermitente) para alguns aços inoxidáveis martensíticos, inclusive o AISI-410.

Tabela 4 - Temperaturas máximas de trabalho de aços inoxidável exposto a atmosfera

AISI type	Maximum service temperature			
	Intermittent service		Continuous service	
	°C	°F	°C	°F
Martensitic grades				
410	815	1500	705	1300
416	760	1400	675	1250
420	735	1355	620	1150
440	815	1500	760	1400

Fonte: *Handbook ASM – Volume 1 – Properties and Selection Iron Steels and High Performace Alloys* – 1993, p. 2122.

Os aços inoxidáveis martensíticos possuem pouca adição de elementos além do Cr. Eles são ferríticos quando recozidos e se resfriados rapidamente em ar ou óleo formam a martensita. Possuem boa resistência mecânica e são magnéticos. A Tabela 5 mostra algumas destas propriedades do aço AISI410 já trabalhado.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas mínimas do aço inoxidável 410

Product form ^(a)	Condition	Tensile strength		0.2% yield strength		Elongation, %	Reduction in area, %	Rockwell hardness	ASTM specification
		MPa	ksi	MPa	ksi				
Type 410 (UNS S41000)									
B, F	Annealed, hot finished	485	70	275	40	20	45	...	A 276, A 473, A 479
B	Annealed, cold finished	485	70	275	40	16	45	...	A 276
B	Intermediate temper, hot finished	690	100	550	80	15	45	...	A 276
B	Intermediate temper, cold finished	690	100	550	80	12	40	...	A 276
B	Hard temper, hot or cold finished	825	120	620	90	12	40	...	A 276
W	Annealed	485	70	275	40	20	45	...	A 580
W	Annealed, cold finished	485	70	275	40	16	45	...	A 580
W	Intermediate temper,	690	100	550	80	12	40	...	A 580

(a) B, bar; F, forgings; P, plate; Sh, sheet; St, strip; W, wire.

Fonte: Handbook ASM – Volume 1 – Properties and Selection Iron Steels and High Performance Alloys – 1993, p. 2102.

A Tabela 6 mostra algumas propriedades físicas do aço AISI410.

Tabela 6 - Propriedades físicas do aço AISI410

Type	UNS number	Density g/cm ³ (lb./in. ³)	Elastic modulus GPa (10 ⁶ psi)	Mean CTE from 0 °C (32 °F) to:			Thermal conductivity		Specific heat ^(a) J/kg · K (Btu/lb · °F)	Electrical resistivity, nΩ · m	Magnetic permeability ^(b)	Melting range °C (°F)
				100 °C (212 °F) μm/m · °C (μin./in. · °F)	315 °C (600 °F) μm/m · °C (μin./in. · °F)	538 °C (1000 °F) μm/m · °C (μin./in. · °F)	at 100 °C (212 °F) W/m · K (Btu/ft · h · °F)	at 500 °C (932 °F) W/m · K (Btu/ft · h · °F)				
410	S41000	7.8 (0.28)	200 (29.0)	9.9 (5.5)	11.4 (6.3)	11.6 (6.4)	24.9 (14.4)	28.7 (16.6)	460 (0.11)	570	700-1000	1480-1530 (2700-2790)

Fonte: Handbook ASM – Volume 1 – Properties and Selection Iron Steels and High Performance Alloys – 1993, p. 2105.

Na Figura 7 verifica-se que o aço AISI410 possui diferentes temperaturas de transição de acordo com o tratamento térmico realizado, observa-se que quanto maior a dureza do aço maior a temperatura de transição dúctil-frágil do aço. Esta propriedade é importante em casos que a condição de trabalho da peça seja em baixas temperaturas.

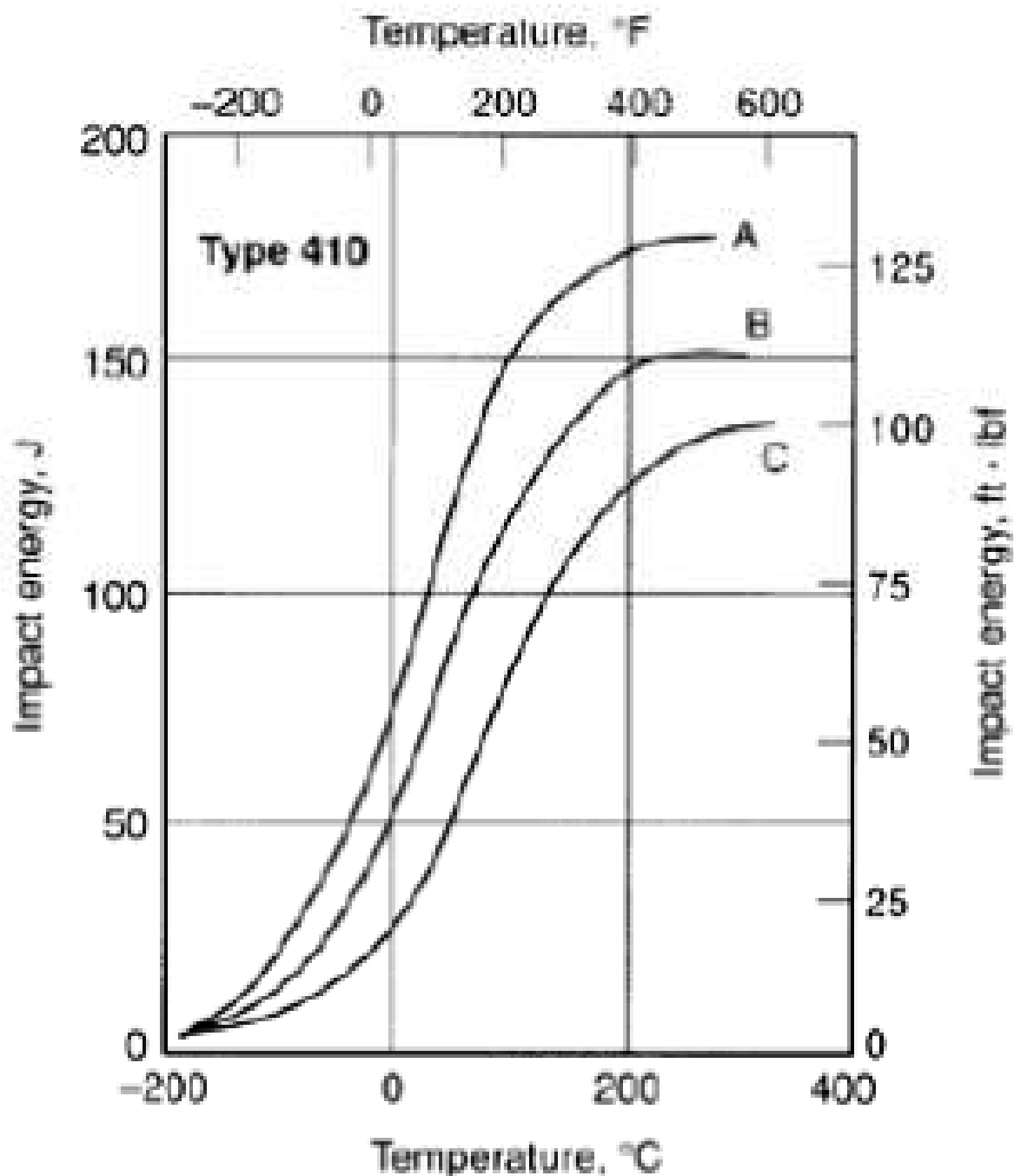


Figura 7 - Temp. de transição do aço inox.410. Ensaio de Charpy V:A-material revenido a 790°C;dureza final 95HRB. B-material revenido a 565°C;dureza final 24HRC. C-material revenido a 595°C. dureza final 30HRC

Fonte: *Handbook ASM – Volume 1 – Properties and Selection Iron Steels and High Performance Alloys* – 1993, p. 2076.

A Tabela 7 mostra a temperatura subcrítica para recozimento (abaixo da linha A1) e a temperatura para recozimento total do aço AISI410.

Tabela 7 - Temperatura de recozimento para aço inoxidável 410

Type	Subcritical annealing temperature range, °C (°F) ^(a)	Full annealing temperature range, °C (°F) ^(a)
403, 410, 416	650-760 (1200-1400)	830-885 (1525-1625)

Fonte: *Handbook ASM – Volume 1 – Properties and Selection Iron Steels and High Performance Alloys* – 1993, p. 2183

A Tabela 8 recomenda que o aço AISI410 seja submetido a pré-aquecimento e tratamento térmico após soldagem.

Tabela 8 - Condições de soldagem para resistência a corrosão do aço inoxidável 410

ACI designation	Type of electrodes used ^(a)	Preheat		Postweld heat treatment
		°C	°F	
CA-15	410	200-315	400-600	610-760 °C (1125-1400 °F), air cool

Fonte: *Handbook ASM – Volume 1 – Properties and Selection Iron Steels and High Performance Alloys* – 1993, p. 2244.

2.3 – Diagrama de Schaeffler

Os diagramas constitucionais são uma importante ferramenta para a previsão da microestrutura da solda e da possibilidade de ocorrência de problemas na soldagem de aços inoxidáveis e destes com outros tipos de aços (MODENESI. 2014).

Estes diagramas permitem prever a microestrutura da solda a partir de sua composição química, expressa em termos de cromo equivalente (Cr_{eq}) e de níquel equivalente (Ni_{eq}).

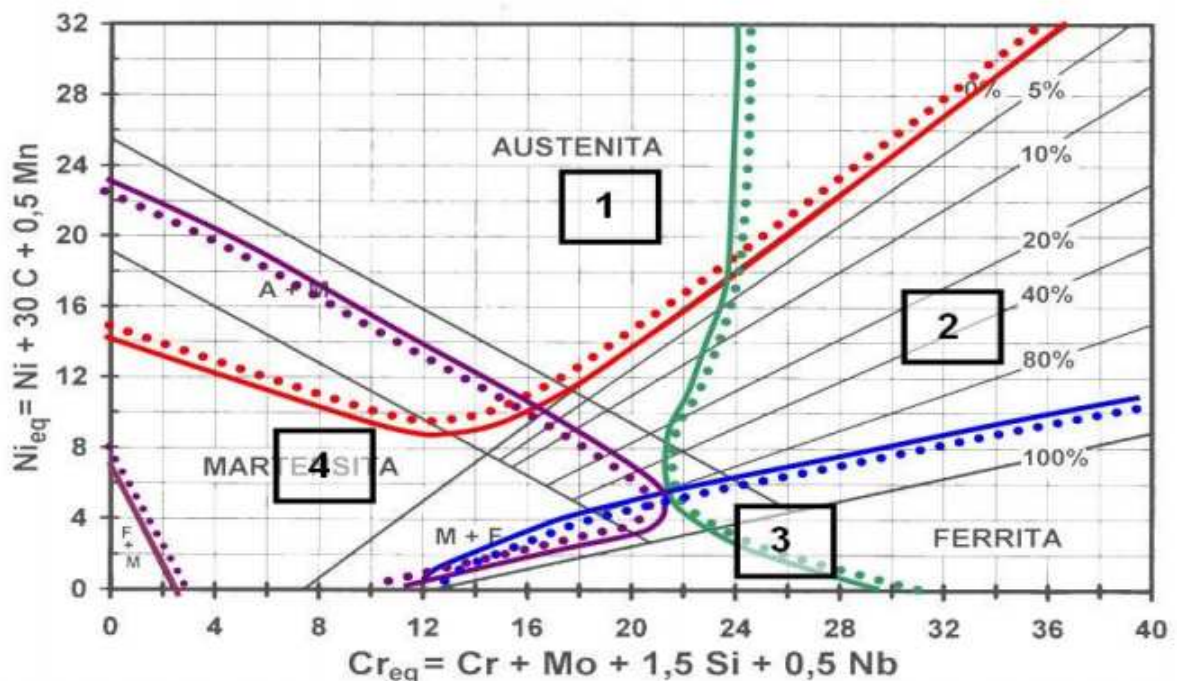


Figura 8 - Diagrama de Schaeffler

Fonte: MODENESI, 2015, p. 66.

A Figura 8 mostra o diagrama de Schaeffler e regiões que possuem características bem definidas.

A região 1 é caracterizada por problemas de fissuração a quente ou por perda de ductilidade acima de 1250°C, que são típicos de ligas que se solidificam basicamente como austenita e estão associados com a segregação de elementos residuais e de alguns elementos de ligas em contornos de grão ou de dendritas ou células de solidificação.

A região 2 é caracterizada pela formação de fase alfa, após aquecimento entre 500 e 900°C, e formação de fase alfa' (fragilização a 475°C) e de outras fases intermetálicas, sendo mais comum em aços inoxidáveis com um maior teor de elementos de liga. Estas formas de precipitação causam, em geral, uma redução na ductilidade e tenacidade do material. Tendem a não ocorrer diretamente durante ou logo após a soldagem uma vez que tempos de exposição de, pelo menos, algumas horas a temperaturas relativamente elevadas são necessários.

A região 3 é caracterizada por problemas de fragilização por crescimento de grão e são típicos de aços inoxidáveis ferríticos.

A região 4 é caracterizada por fragilização e fissuração pela formação de martensita.

Finalmente, a Figura 8 indica a existência de uma região triangular na parte central do diagrama de Schaeffler (nos campos de ocorrência de austenita mais ferrita e destas fases com a martensita) que não é afetada por nenhum dos problemas de soldabilidade indicados anteriormente. Esta região é considerada como a ideal sob o ponto de vista de soldabilidade para a composição da solda (isto é, resultante de contribuições do metal de adição e do metal de base de acordo com a diluição) de aço inoxidável austenítico para aplicações usuais (MODENESI. 2014).

3 – METODOLOGIA

O presente trabalho consiste em definir um processo de reparação das sedes de válvula de um cabeçote de motor diesel de locomotiva e para alcançar este objetivo o trabalho será subdividido nas etapas demonstradas nos subcapítulos a seguir.

3.1 - Análise de Material

Neste capítulo serão apresentados os ensaios necessários para identificar o tipo do material, propriedades mecânicas, microestrutura e características. Para isto foi realizada uma análise em laboratório com os seguintes testes:

- análise química do material de base do cabeçote e do material da sede da válvula (via úmida);
- análise metalográfica do material de base do cabeçote e do material da sede da válvula;
- análise de dureza do material de base do cabeçote;
- perfil de microdureza do material da sede de válvula;
- micrografia óptica do material da sede de válvula.

Após a seleção do material de solda e realização de testes práticos foram realizadas novas análises em laboratório para verificar o material soldado. Os seguintes testes serão repetidos:

- análise metalográfica do material da sede da válvula;
- perfil de microdureza do material da sede de válvula;
- micrografia óptica do material da sede de válvula.

4- RESULTADOS

4.1 – Análises das condições de trabalho e do dimensional cabeçote

Foi realizada uma análise da geometria interna do cabeçote e seus limites dimensionais, em especial na região da sede de válvula e também avaliação das condições de trabalho do componente.

Na Figura 10 estão ilustradas as dimensões externas aproximadas do cabeçote. O principal mecanismo de desgaste do cabeçote é a perda do dimensional na sede de válvula do cabeçote (indicado em vermelho na Figura 9), este limite é verificado através da altura da válvula em relação à face de fogo do cabeçote, conforme também ilustrado na Figura 9.

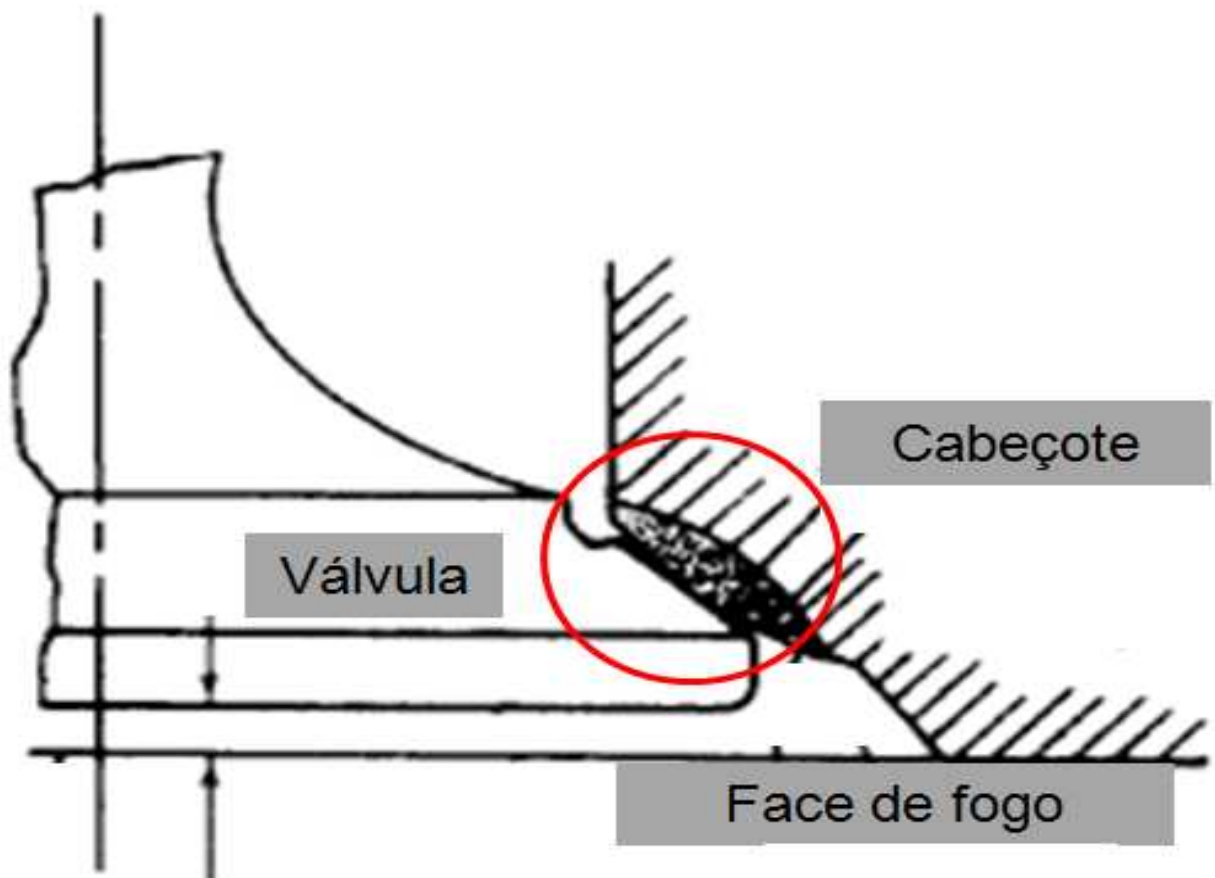


Figura 9 - Principal mecanismo de desgaste do cabeçote 7FDL.



Figura 10 - Cabeçote de motor diesel 7FDL seccionado para análise

Alguns cabeçotes já passaram por processo de reparação utilizando diferentes materiais de adição e, em alguns casos, podem não serem detectáveis através de inspeção visual e com isso existe o risco de se obter composições químicas diferentes das analisadas e propriedades mecânicas indesejáveis para a aplicação do cabeçote. Com isso será definido a retirada total da sede de válvula (aproximadamente 4 a 5 mm no raio da sede e 5 a 6 mm de profundidade).

Um dos modos de falha que os cabeçotes reparados apresentam são trincas na região da sede de válvula. Na Figura 11 tem-se a vista em corte do cabeçote de motor diesel 7FDL na região da sede de válvula, uma trinca nesta região pode significar a passagem de água para dentro da câmara de combustão, que pode gerar falhas de baixa pressão de água ou motor diesel quente, devido à perda do nível de água de arrefecimento, além disso, a passagem de água ocasiona o acúmulo de sujidades na sede da válvula, que pode ocasionar o incorreto assentamento da válvula na sede e, com isso, uma baixa taxa de compressão no cilindro, gerando perda de potência do motor diesel. Em casos extremos o vazamento de água para dentro da câmara de combustão resulta em danos

catastróficos ao motor, podendo gerar perda de componentes importantes como bielas, bloco e virabrequim.

A usinagem de rebaixamento inicial do cabeçote deverá ser o suficiente para remover todo o material da sede de válvula e deverá ser o mínimo para manter a região rebaixada o mais distante possível das câmaras de arrefecimento internas do cabeçote, reduzindo assim o risco de falhas por trinca na sede de válvula.



Figura 11 - Detalhe da região da sede da válvula seccionada ao meio.



Figura 12 - Vista em corte do cabeçote do motor diesel 7FDL

Outro fator importante a ser analisado para escolha correta do consumível de soldagem é que este deve suportar elevadas temperaturas de trabalho. A temperatura do gás de escape pode chegar até 650°C quando o motor diesel está em carga e em 8º ponto (condição máxima de trabalho), durante o ciclo de explosão as temperaturas chegam até 2000 e 3000°C , a temperatura do fluido de arrefecimento que circular no interior do cabeçote pode chegar até 110°C . O consumível de soldagem na sede de válvula deve ter boas propriedades mecânicas a 650°C , que é a temperatura que os gases de escape trocam calor com a sede de exaustão.

4.2 – Análise de material

Inicialmente na análise nº 1 foi realizado ensaio metalográfico e podem ser percebidos três cordões de solda, indicados pelas letras A, B e C, na Figura 13, na Figura 14 e na Figura 15. Pelas imagens é possível perceber um processo de soldagem por fusão com pelo menos três passes. Também se percebem alterações geométricas ao longo do cordão, indicando possível soldagem manual. Na Figura 15 observa-se a presença de um defeito de soldagem por falta de fusão (abaixo da letra A).

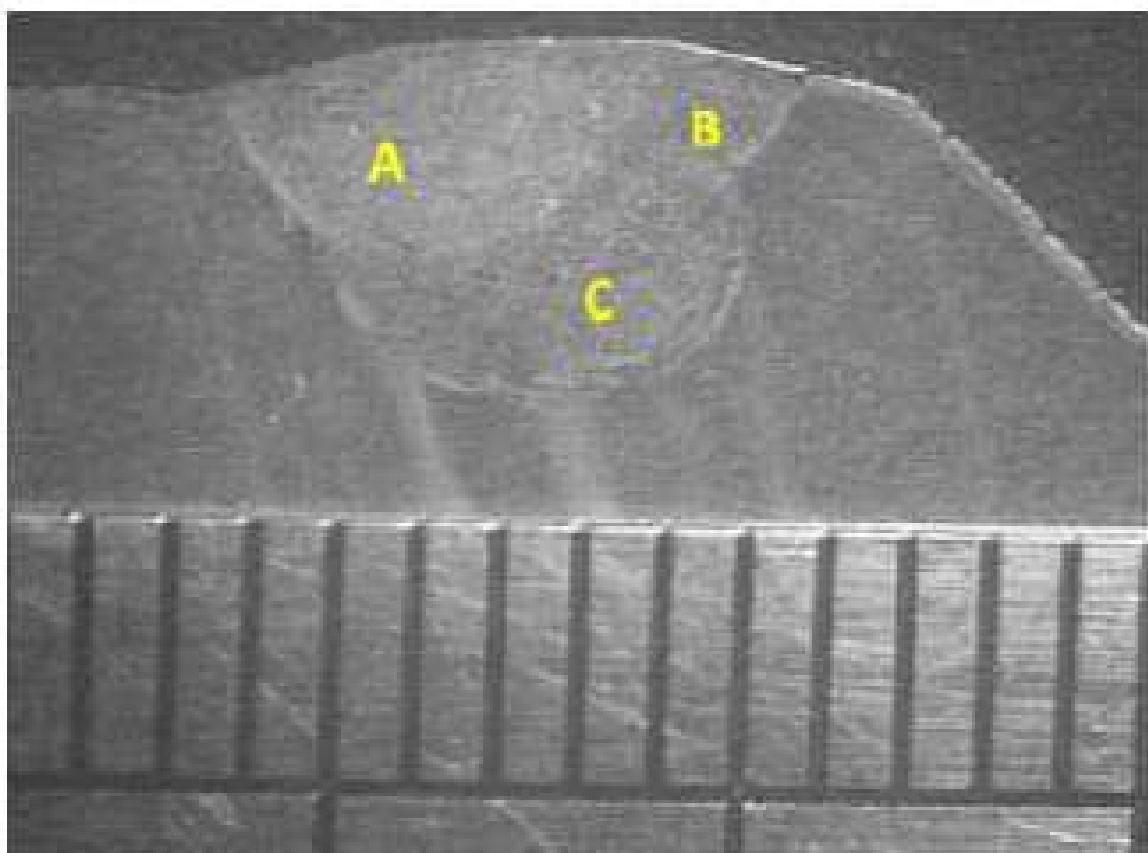


Figura 13 - Cordão de solda na amostra 1 (análise nº 1).

Fonte: Laudo LRSS nº 9-2015. 2015, p. 7.

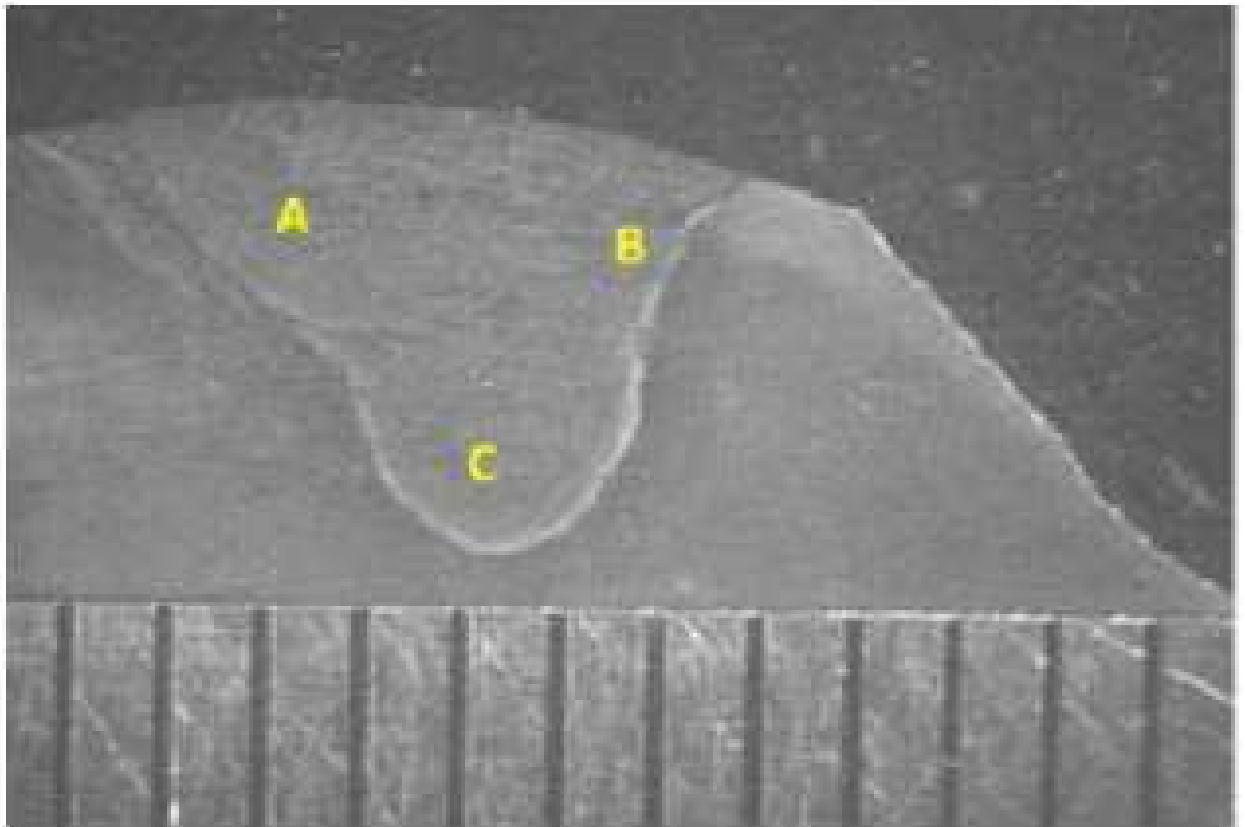


Figura 14 - Cordão de solda na amostra 2 (análise nº 1).

Fonte: Laudo LRSS nº 009-15. 2015, p. 7.

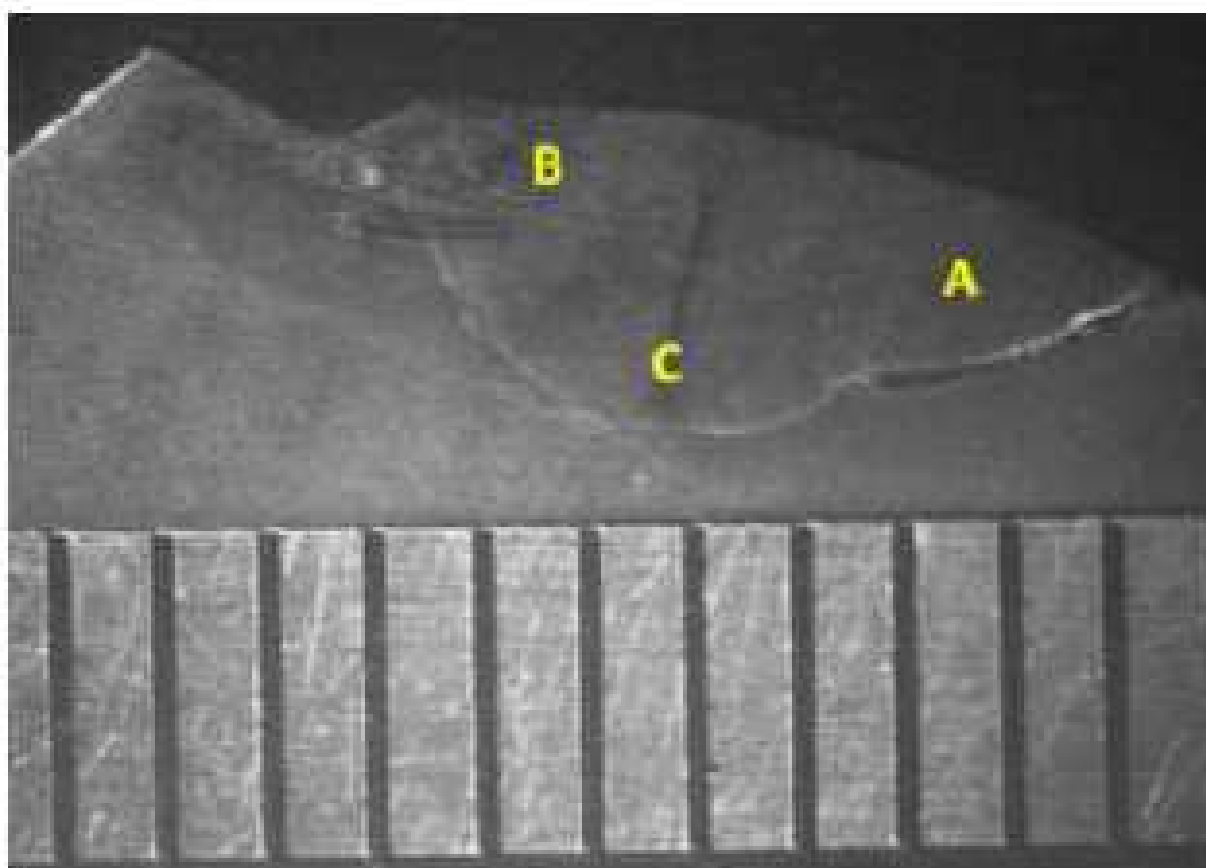


Figura 15 - Cordão de solda na amostra 3 (análise nº 1).

Fonte: Laudo LRSS nº 009-15. 2015, p. 8.

Na Figura 16, na Figura 17 e na Figura 18 estão apresentadas as micrografias dos cordões de solda na forma de mosaicos (Varias fotos montadas com programa especial), confirmando os aspectos macrográficos da amostra. Os cordões estão indicados pelas letras A, B e C. Foi possível também, por meio das imagens, notar a presença de regiões onde ocorreu falha no processo de soldagem (setas em vermelho) que foram identificadas como possíveis faltas de fusão. A evolução destas regiões ao longo do comprimento da solda pode ser acompanhada por meio da comparação das imagens.

Outra característica importante é o limite entre o metal de solda e a ZTA. Na Figura 16, na Figura 17 e na Figura 18, nota-se uma ZTA bem fina com a presença de epitaxia, pouco pronunciada, e a presença de uma microestrutura no metal de solda distinta do metal do cabeçote, sendo a microestrutura deste último composta de ferrita e perlita, portanto coerente com demais resultados obtidos na análise. O metal de solda apresentou uma microestrutura composta de pequenas placas/ripas,

identificadas como estrutura martensítica, que condizem com os resultados de dureza e análise química.

Os resultados da micrografia e macrografia realizadas na análise nº1 foram confrontados com outras análises, que não foram detalhadas neste trabalho.

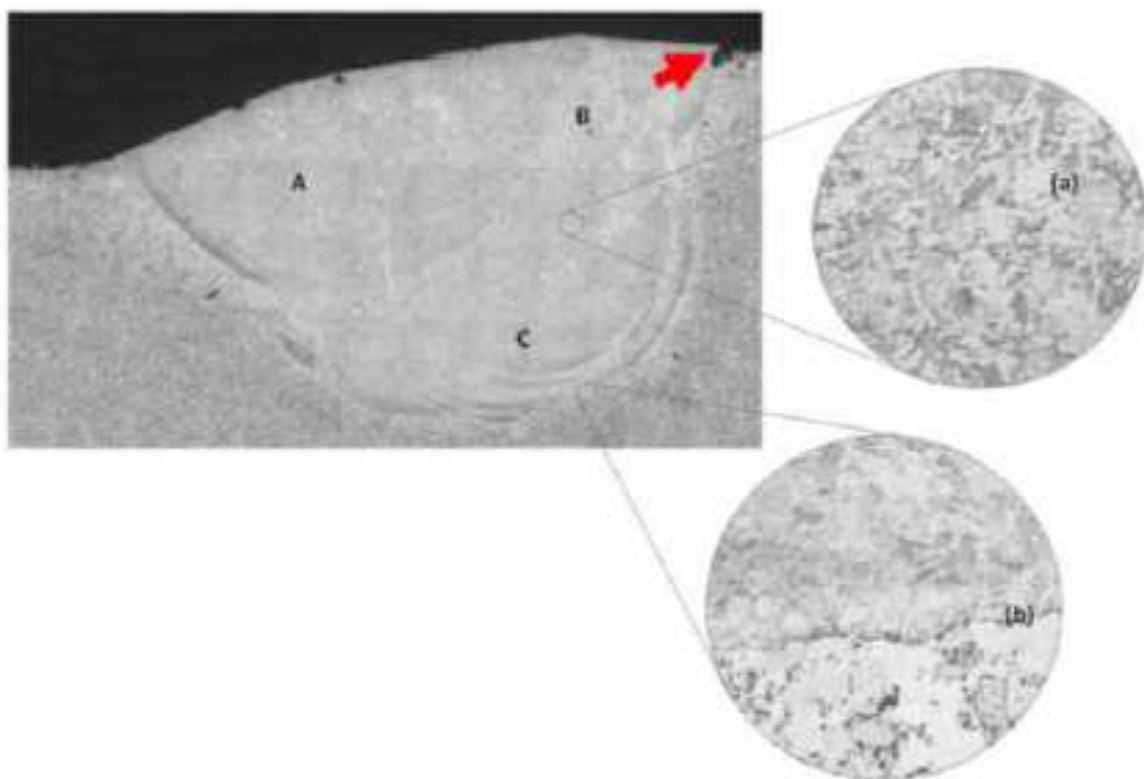


Figura 16 - Mosaico da Amostra 1. Destaque para microestrutura do cordão e (b) da região limite entre o metal de solda e a ZTA (análise nº 1).

Fonte: Laudo LRSS nº 009-15. 2015, p. 9.

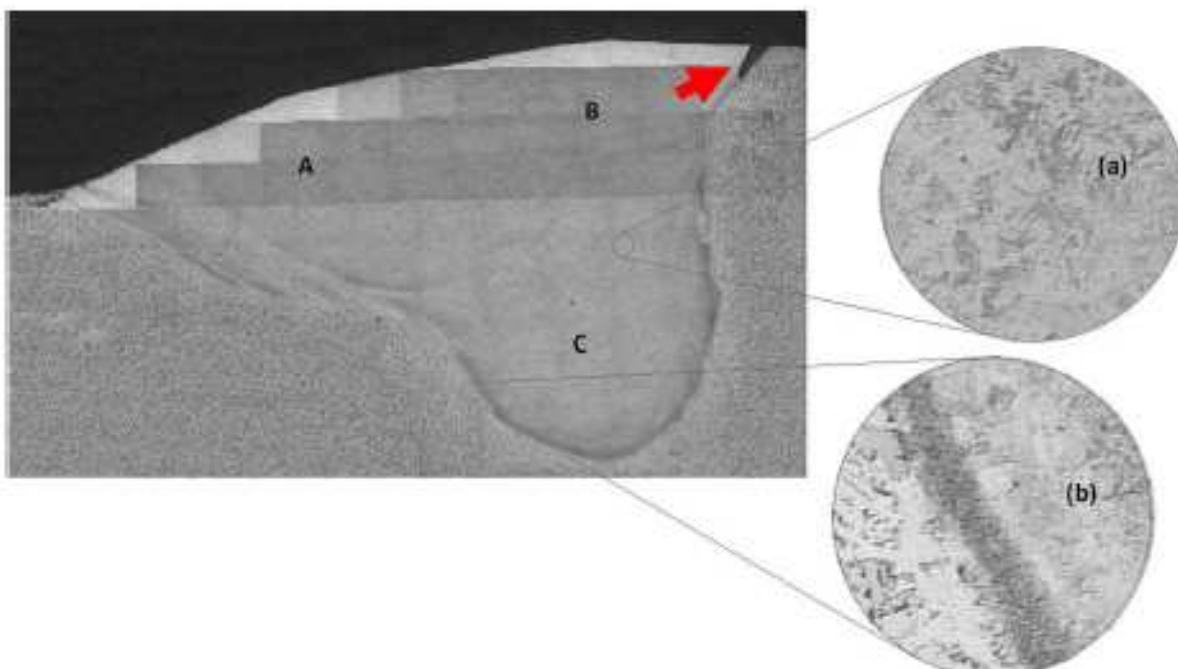


Figura 17 - Mosaico da Amostra 2. Destaque para microestrutura do cordão e (b) da região limite entre o metal de solda e a ZTA (análise nº 1).

Fonte: Laudo LRSS nº 009-15. 2015, p. 9.

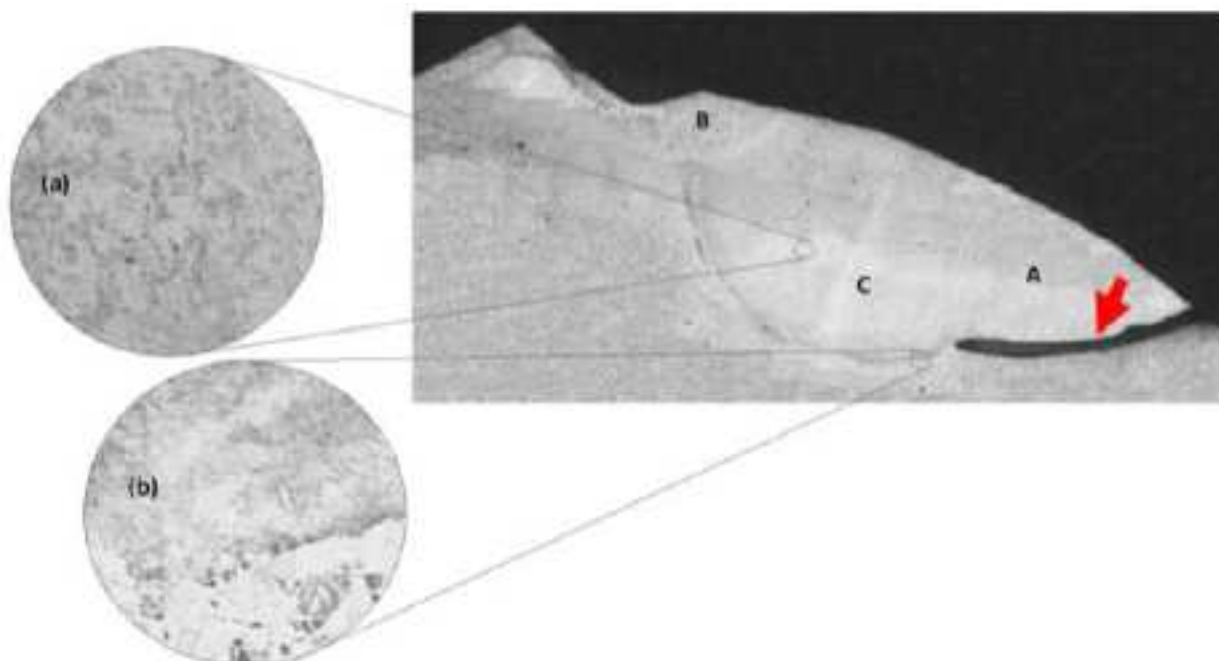


Figura 18 - Mosaico da Amostra 3. Destaque para microestrutura do cordão e (b) da região limite entre o metal de solda e a ZTA (análise nº 1).

Fonte: Laudo LRSS nº 009-15. 2015, p. 10.

Os resultados de microdureza foram de extrema importância na determinação das fases microestruturais presentes nas distintas regiões da amostra e especulação

com relação ao processo de soldagem. Foi possível com o ensaio determinar três faixas distintas de valores: O material de base do cabeçote, da região da sede de válvula (solda) e da ZTA. A Tabela 9 sumariza os resultados. De um modo geral percebe-se que os valores de dureza estão condizentes com as distintas regiões. O metal do cabeçote, apresentando dureza na faixa de 200HV indica que se trata de um aço de baixo carbono com baixa liga. O metal de solda, com valores na faixa de 450HV indica que provavelmente trata-se de um aço martensítico. Finalmente a dureza da ZTA, na faixa de 540 HV indica que o metal de solda foi depositado com baixo aporte térmico localizado, gerando uma ZTA muito estreita que resfriou muito rapidamente.

Os resultados de microdureza da análise nº 1 estão coerentes com outras análises realizadas em outras amostras e não detalhadas neste trabalho.

Tabela 9 - Resultados de Dureza (análise nº 1).

Parte das amostras	Amostra	Media por amostra	Desvio	Média	Desvio
Metal do cabeçote	1	213,10 Hv	13,98	204,76	11,00
	2	201,80 Hv	10,56		
	3	199,37 Hv	8,47		
Metal de solda	1	447,13 Hv	21,79	450,54	19,90
	2	463,37 Hv	9,20		
	3	441,13 Hv	28,70		
ZTA	1	518,57 Hv	13,95	540,72	20,14
	2	565,73 Hv	14,84		
	3	536,87 Hv	31,63		

Fonte: Laudo LRSS nº 009-15. 2015, p. 11.

Na Tabela 10 verifica-se o resultado da análise química do material de base do cabeçote.

Tabela 10 - Resultado análise química do material de base do cabeçote (análise nº1).

Composição (% Peso)	C	Si	Mn	P	S	Mo	Cu	Fe
Metal de Base	0,1946	0,5391	1,3308	0,0212	0,0050	0,1829	0,3496	97,3086

Fonte: Laudo LRSS nº 009-15. 2015, p. 11.

A análise química do metal de solda revelou que este material se trata de uma liga de aço inoxidável martensítico tipo AISI 410, o que se pode comprovar por meio da comparação da mesma e da composição química regida pela norma europeia EN10088-2 para aços inoxidáveis, apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultado análise química do material da sede de válvula do cabeçote (análise nº1).

Composição (% Peso)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	W	V
Metal de Solda	0,109	0,589	0,52 1	0,0153	0,0162	10,22	0,1829	0,3496	-	0,0384
Norma	0,05- 0,12	0,10- 0,8	0,62 0	Máx. 0,025	Máx. 0,015	9,8- 11,2	0,2-1,2	0,5-1	Máx. 0,7	0,1-0,4

Fonte: Laudo LRSS nº 009-15. 2015, p. 12.

Podemos concluir como fato que o metal da sede de válvula foi depositado pelo processo de fusão pela deposição de vários passes.

Pelo aspecto visual da ZTA (faixa estreita) e elevada dureza o processo de deposição utilizou baixo aporte térmico e com uma alta taxa de resfriamento.

O metal de adição da sede de válvula é o AISI 410, bastante utilizado em aplicações deste tipo e, comercialmente, encontrado na forma de consumível (eletrodos, arames sólidos e tubulares e varetas), regido pela norma AWS SFA-5.4.

Os defeitos de soldagem apresentados na Figura 15, na Figura 16, na Figura 17 e na Figura 18 apesar de serem indesejáveis não tiveram influencia na confiabilidade do componente, visto que os cabeçotes analisados chegaram ao final da vida através do mecanismo de desgaste.

4.3 – Proposta de novo consumível

O consumível utilizado no componente original possui composição química similar ao aço AISI 410, que possui excelentes propriedades mecânicas e suporta elevadas temperaturas de trabalho. O presente trabalho propõe como alternativa ao aço inoxidável 410, um consumível com adição de Ni e Mo e redução do teor de C, será

utilizado o consumível 410NiMo. A Tabela 12 mostra as composições químicas de acordo com a AWS (*American Welding Society*).

Tabela 12 - Composição química dos consumíveis 410 e 410NiMo.

AWS CLASSIFICATION	COMPOSITION, %								
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu
SMAW (PER AWS 5.4)									
E410	0.12	11.0-13.5	0.60	0.75	1.0	0.90	0.04	0.03	0.75
E410NiMo	0.06	11.0-12.5	4.0-5.0	0.40-7.0	1.0	0.90	0.04	0.03	0.75
GMAW, GTAW, AND SAW (PER AWS 5.9)									
ER410	0.12	11.5-13.5	0.6	0.75	0.6	0.50	0.03	0.03	0.75
ER410NiMo	0.06	11.0-12.5	4.0-5.0	0.4-0.7	0.6	0.50	0.03	0.03	0.75

Fonte: *Handbook ASM – Volume 1 – Properties and Selection Iron Steels and High Performance Alloys* – 1993, p. 1122.

A adição do níquel refina o tamanho do grão, aumenta a ductibilidade, evita o fenômeno de corrosão intergranular nos aços Cr-Ni.

A adição de Molibdênio aumenta a resistência mecânica a altas temperaturas, assim como a resistência à fluência, além disso, eleva a temperatura de crescimento de grão da austenita.

Com a redução do teor de Carbono se melhora a soldabilidade e a resistência à corrosão. A martensita é dura e frágil e sua fragilidade aumenta com o teor de carbono. A presença deste constituinte, juntamente com tensões residuais, concentradores de tensão e hidrogênio em solução, pode levar à formação de trincas. Estas trincas podem se propagar rapidamente e levar à falha do componente.

Na Tabela 13 se verificam as propriedades mecânicas do aço, em relação às resistências ao escoamento e à ruptura o 410NiMo possui considerável superioridade em relação ao 410, 76% e 300% respectivamente e uma leve redução do alongamento percentual.

Tabela 13 - Propriedades mecânicas de aços inoxidáveis martensíticos

DESIGNATION	UNS NO.	ASTM SPECIFICATION	TENSILE STRENGTH		YIELD STRENGTH		ELONGATION, %
			MPA	KSI	MPA	KSI	
XM-32	K64152	A 565	1000	145	790	115	15
403	S40300	A 479	480	70	275	40	20
410	S41000	A 240	450	65	205	30	20
410S	S41008	A 240	415	60	205	30	22
XM-30	S41040	A 479	480	70	275	40	13
...	S41041	A 565	790	115	520	75	15
...	S41050	A 240	415	60	205	30	22
414	S41400	A 479	790	115	620	90	15
410NIMO	S41500	A 240	790	115	620	90	15

Fonte: Handbook ASM – Volume 1 – *Properties and Selection Iron Steels and High Performance Alloys* – 1993, p. 1676.

Outro fator importante para análise é a temperatura de formação de martensita (Ms). Pela equação de Andrews (equação 1) temos que:

Equação 1 - Equação de Andrews (linear).

$$Ms (^{\circ}C) = 539 - 423C - 30.4Mn - 12.1Cr - 17.7Ni - 7.5Mo.$$

Considerando consumíveis ER410 (C 0.11%;Mn 0.45%; Ni 0.1%; Cr 12.5%; Mo 0.03%) e ER410NiMo (C 0.02%;Mn 0.45%; Ni 4.5%; Cr 11.7%; Mo 0.5%) e substituindo os valores na Equação 1 temos Ms 296°C e 326°C, respectivamente para ER410NiMo e ER410, ou seja, a diferença entre tais valores não é significativa.

Através do diagrama de Schaeffler, rerepresentado na

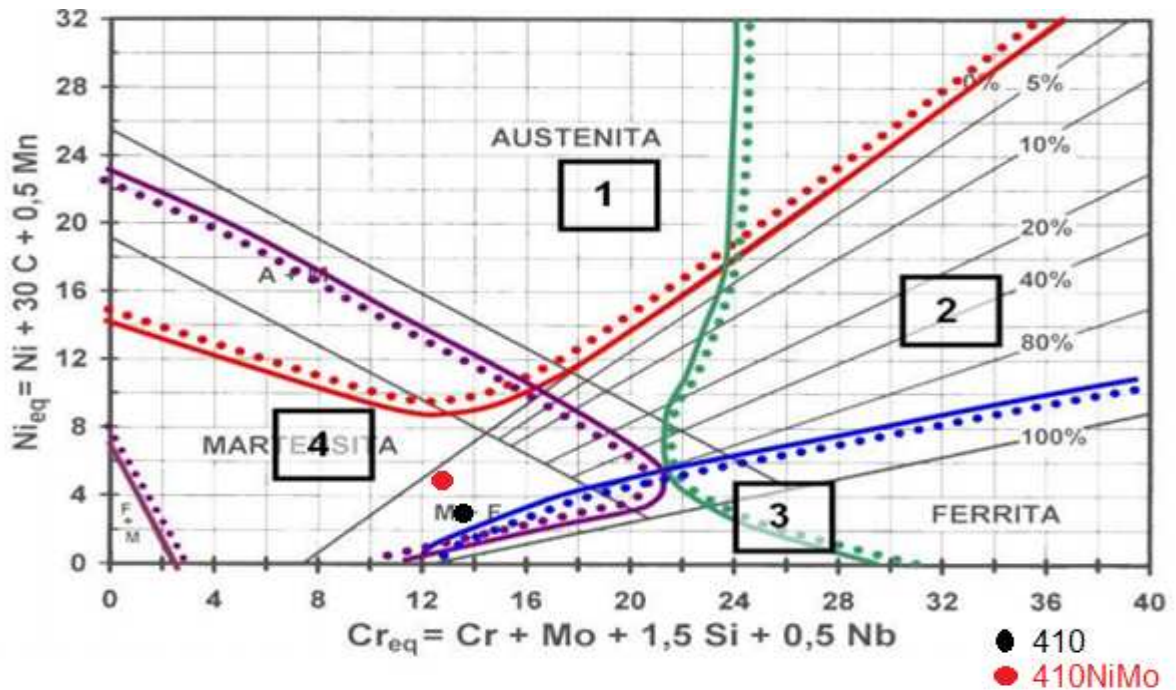


Figura 19, verifica-se que os consumíveis ER410 e ER410NiMo estão na região nº 4, zona martensítica, que é a microestrutura desejada para este tipo de aplicação, devido sua elevada dureza. Os teores de Ni_{eq} e Cr_{eq} são 3.6 e 13.1 para ER410 e 5.3 e 12.8 para ER410NiMo. Foram utilizadas as seguintes composições químicas C 0.11%;Mn 0.45%; Ni 0.1%; Cr 12.5%; Mo 0.03%;Si 0.4%; Nb 0%; e C 0.02%;Mn 0.45%; Ni 4.5%; Cr 11.7%; Mo 0.5%;Si 0.4%; Nb 0%, para ER410 e ER410NiMo respectivamente.

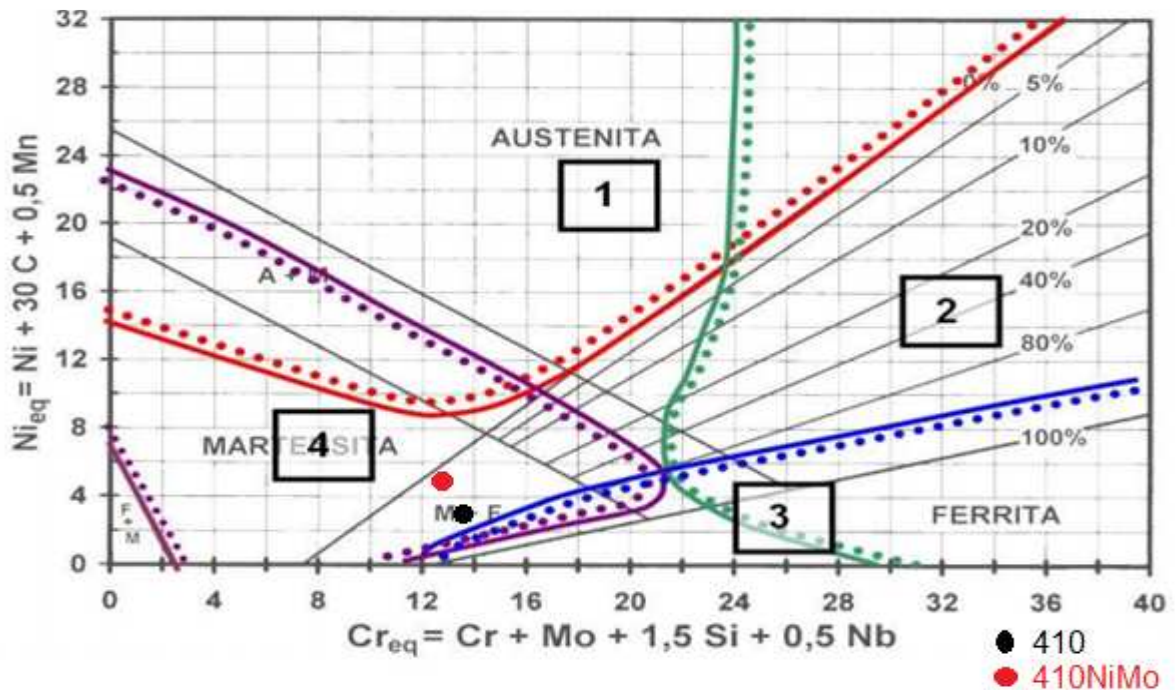


Figura 19 - Diagrama de Schaeffler para os consumíveis inoxidáveis 410 e 410NiMo.

Outro ponto importante para subsidiar a escolha no consumível 410NiMo é a verificação dos teores de Cr_{eq} e Ni_{eq} previstos para o metal fundido (sede da válvula). Como o processo irá utilizar correntes relativamente baixas, a taxa de diluição estimada será de 20% (o valor para soldagem GMAW varia entre 20 e 40% usualmente). Os valores encontrados estão representados Tabela 14. Na

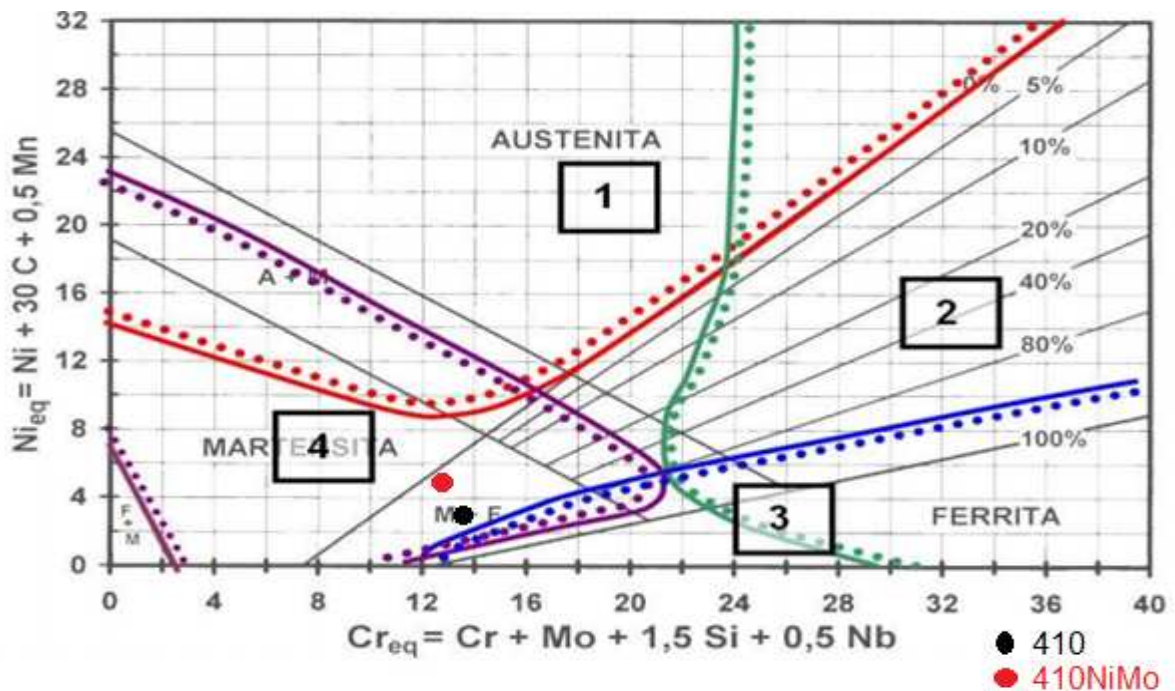


Figura 19 tem-se a ilustração gráfica no Diagrama de Schaeffler do metal fundido, nota-se que o material se encontra na região 4, que possui como característica a

martensita como microestrutura, que é uma propriedade desejada para esta aplicação devido aos elevados valores de dureza.

Tabela 14 - Cr_{eq} e Ni_{eq} previsto para o metal fundido (sede da válvula).

	MAT. BASE*	ER410NiMo	SEDE VÁL.20%
Cr	0,3	11,8	9,5
Mo	0,23	0,55	0,486
Si	0,44	0,4	0,408
Nb	0,002	0	0,0004
C	0,15	0,02	0,046
Mn	1,31	0,45	0,622
Ni	0,06	4,5	3,612
Cr_{eq}	1,191	12,95	10,5982
Ni_{eq}	5,215	5,325	5,303

*referente à amostra 015-285 do laudo MIB 0175-15.

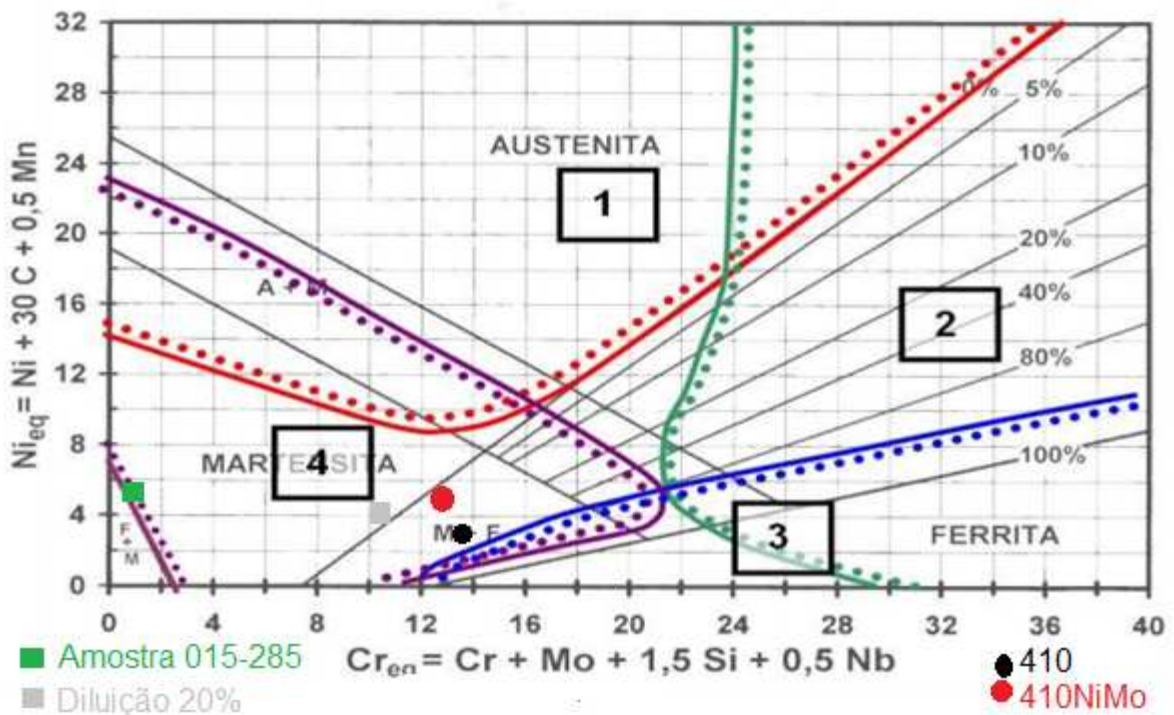


Figura 20- Diagrama de Schaeffler previsto para o metal de fundido (sede de válvula).

A maioria das literaturas recomenda a realização de tratamento térmico pré e pós soldagem para consumíveis martensíticos. Porém segundo HANDBOOK ASM – Vol. 1 (P1128) para teores de C abaixo de 0,1% e espessuras menores que 5mm o pré-aquecimento e pós aquecimento podem ser dispensados se o teor de hidrogênio for

baixo. Para isso, a peça deve estar totalmente livre de água, graxa, óleo e outras sujidades que possam conter hidrogênio.

Uma vantagem do uso do ER410NiMo em relação ao ER410 é que o teor de carbono inferior do primeiro elimina a recomendação de tratamento térmico segundo o HANDBOOK ASM Vol. 1(p. 1129 - 1993). Pois para teores de carbono entre 0.11% e 0.20% é necessário pré-aquecimento e resfriamento controlado.

Foram realizados pré-testes de soldagem sobre chapa fina através do processo GMAW com o ER410NiMo (nome comercial Esab AutoRod 410NiMo), com 1,2mm Ø, correntes 200A e 220A, gás de proteção Ar+20%CO₂ para verificar o valor de dureza encontrado após três cordões sobrepostos (número de passes estimados para encher a sede de válvula). A dureza variou entre 40 e 41 HRC para 200A e entre 40 e 44HRC para 220A, valores compatíveis com a necessidade e com as características originais da sede do cabeçote.

4.4 – Realização de testes práticos

Após pesquisa realizada conforme escrito no capítulo 3 e análises detalhadas no capítulo 4 foram realizados ensaios práticos, simulando a reparação das sedes de válvulas do cabeçote utilizando o consumível OK AutoRod 410NiMo e o processo GMAW.

O cabeçote serial EG08080731 foi inicialmente separado da camisa e suas sedes de válvulas foram rebaixadas para realização do enchimento com solda. Foi utilizada a máquina de solda retificadora Bambozi TRR 34105NMR, gás de proteção Argônio+2% CO₂ e utilizadas correntes em cada sede conforme a Tabela 15. Este primeiro teste será chamado como teste nº 1.

Tabela 15 - Parâmetros utilizados na soldagem do cabeçote serial EG08080731 (teste nº 1).

Sede	NºPasses	Corrente(A)
A	3	250
B	4	200
C	4	175

Utilizando os parâmetros da Tabela 15 foram encontrados os valores de composição química e de dureza mostrados na Tabela 16. Percebe-se que com a redução da corrente de soldagem a redução da diluição do material de base do cabeçote no metal fundido, os teores de Cr e Ni (elementos de liga do consumível) são maiores na sede C, devido ao menor valor de corrente empregado. Os valores de dureza encontrados foram compatíveis com os citados no capítulo 4.2.

Tabela 16 - Composição química e dureza das sedes reparadas com OK Autorod 410NiMo(teste nº1).

Sede	Nº Passes	Corrente (A)	C(%)	Si(%)	Mn(%)	Cr(%)	Ni(%)	Mo(%)	Dureza (HRC)
A	3	250	0,028	0,32	0,63	9,73	3,16	0,41	28-36
B	4	200	0,036	0,34	0,68	10,6	3,36	0,51	38-42
C	4	175	0,027	0,33	0,53	12,61	4,04	0,48	37-40

Vale ressaltar que durante corte das amostras não foram encontradas irregularidades na solda.

Na Figura 21 nota-se que as soldas obtiveram bom aspecto visual, com baixo número de respingos. A solda realizada na sede “D” conforme Figura 21 não será considerada nesta análise. Foi realizado teste de líquido penetrante para verificar possíveis trincas na superfície da solda e nada de anormal foi constatado conforme ilustrado na Figura 22.

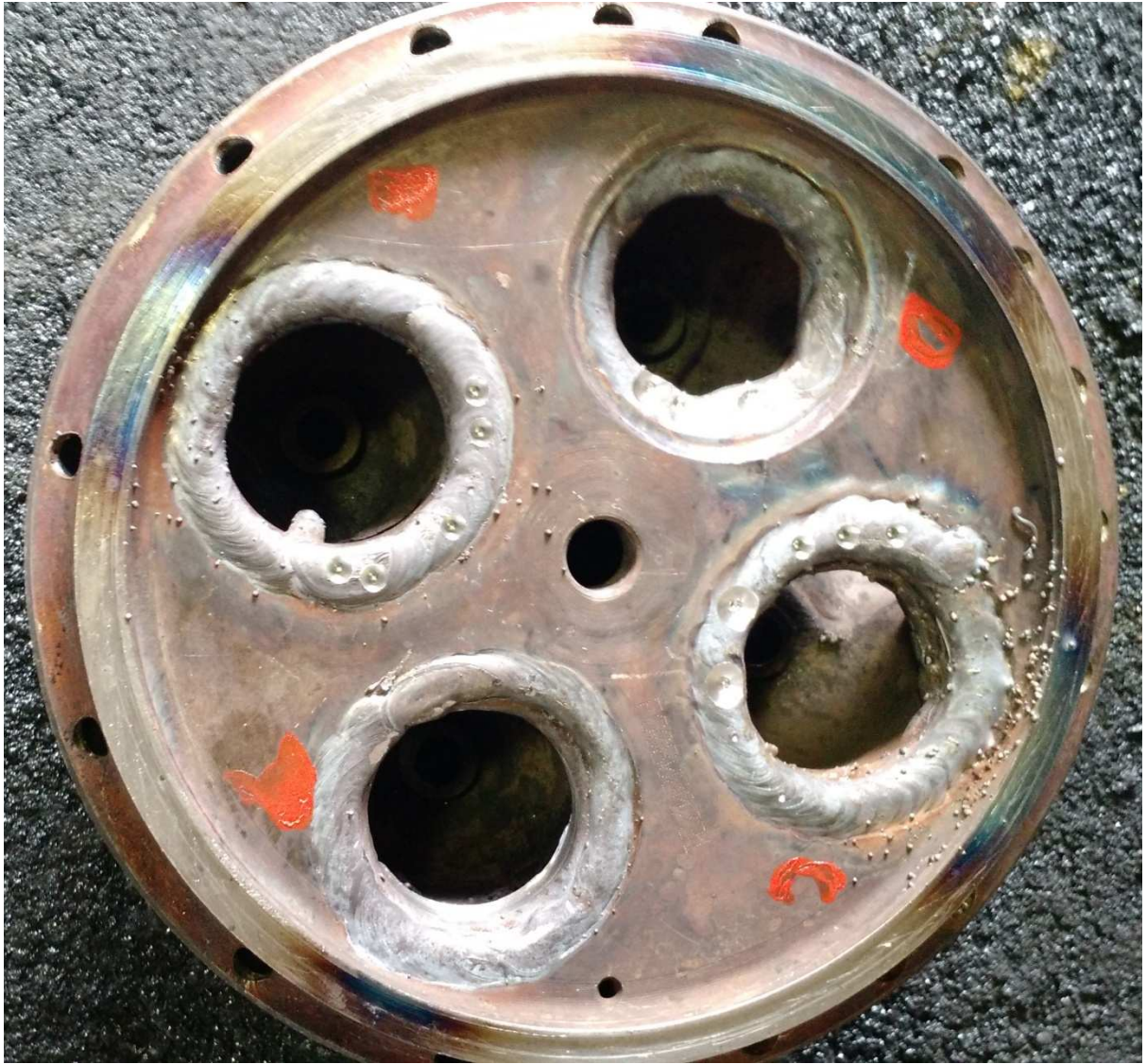


Figura 21 - Vista superior do cabeçote após enchimento com OK AutoRod 410NiMo ESAB (teste nº 1).



Figura 22 - Teste de líquido penetrante no cabeçote após enchimento com OK AutoRod 410NiMo ESAB (teste nº 1).

Foi realizado um segundo teste utilizando processo GMAW, máquina de solda retificadora Bambozi TRR 34105NMR, arame OK AutoRod 410NiMo ESAB, gás de proteção Argônio+2% CO₂ e utilizados os parâmetros da Tabela 17.

Tabela 17 - Parâmetros utilizados na soldagem do cabeçote serial EG98110665 (teste nº 2).

Sede	NºPasses	Corrente (A)
A	6	130-140
B	5	160-180

Foi realizada nova análise química no metal de base do cabeçote em duas amostras (Tabela 18) e os resultados foram compatíveis com as análises apresentadas no capítulo 3.

Tabela 18 - Análise química do material de base do cabeçote serial EG98110665 (teste nº 2).

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Nb	Al	Cu	Sn	Fe
MIB-16-0358	0,16	0,43	1,40	0,010	0,003	0,29	0,05	0,24	0,006	0,001	ND	0,010	0,035	0,006	Bal
MIB-16-0359	0,16	0,42	1,41	0,011	0,003	0,29	0,05	0,24	0,006	0,001	ND	0,012	0,035	0,006	Bal
ASTM A487 - Grade 2	0,30 max	0,80 max	1,00-1,40	0,04 max	0,045 max	0,35* max	0,50* max	0,10-0,30	0,03* max	NE	NE	NE	0,50* max	0,10* max	Bal

NE - Não especificado , ND - Não detectado

Fonte: Relatório MIB 195-16, Pág 2.

A Tabela 19 apresenta os resultados da análise química, via EDX, do material depositado. A amostra MIB-16-0358 se refere à sede nº A e a amostra MIB-16-0359 se refere à sede nº B citadas na Tabela 17. A análise química mostrada na Tabela 19 foi realizada via EDX, que proporciona grau de incerteza maior que as análises químicas via úmida, contudo nota-se uma ligeira redução nos teores de Cr e Ni com a redução dos valores de corrente aplicados.

Tabela 19 - Composição química das sedes reparadas com OK Autorod 410NiMo (teste nº2).

Amostra	Região	Mn	Ni	Cr	Mo	Fe
MIB-16-0358	Solda	0,83	3,96	12,6	0,61	Bal
MIB-16-0359		0,75	3,81	12,0	0,43	Bal

Fonte: Relatório MIB 195-16, Pág 2.

Na Tabela 20 verificam-se os valores de dureza encontrados na análise das sedes reparadas e do material de base do cabeçote do teste nº 2. Os valores do material de base são compatíveis com os valores apresentados no capítulo 3.

Tabela 20 - Dureza das sedes reparadas com OK Autorod 410NiMo e do material de base do cabeçote (teste nº2).

Amostra	Local	Tipo	Medidas (HRB)					Média (HR)	Média (HBW)
MIB-16-0358	Material Base	HRB	89	89	91	89	91	89,8	185
MIB-16-0359			89	91	91	90	90	90,2	185
MIB-16-0358	Solda	HRC	31	34	36	31	32	32,8	308
MIB-16-0359			32	34	34	38	35	34,6	324

Fonte: Relatório MIB 195-16, Pág 2.

Na Figura 23 e na Figura 24 são mostrados os valores de microdureza encontrados na solda e a microestrutura de cada amostra. Percebe-se a presença de uma microestrutura martensítica, uma ZTA estreita e valores de dureza entre 310 e

400HV (31 e 41HRC) aproximadamente. Nota-se também a presença de defeitos, vazios, sendo prováveis “gotas frias”, ou seja, a falta de fusão entre o metal fundido e o metal de base, tal defeito pode ser explicado pela ausência de pré-aquecimento e pelas baixas correntes empregadas no teste nº2. Soluções para este tipo de defeito podem ser a utilização de um arame de menor bitola ou o aumento da corrente de soldagem. Vale ressaltar que apesar dos defeitos citados anteriormente não foram encontradas trincas, que é um modo de falha extremamente crítico e que pode levar à falha catastrófica do motor diesel conforme citado no capítulo 4.1. Este modo de falha da solda (gota fria) também foi encontrado no cabeçote em sua condição original ao final de sua vida útil e sem resultar num modo de falha do componente.

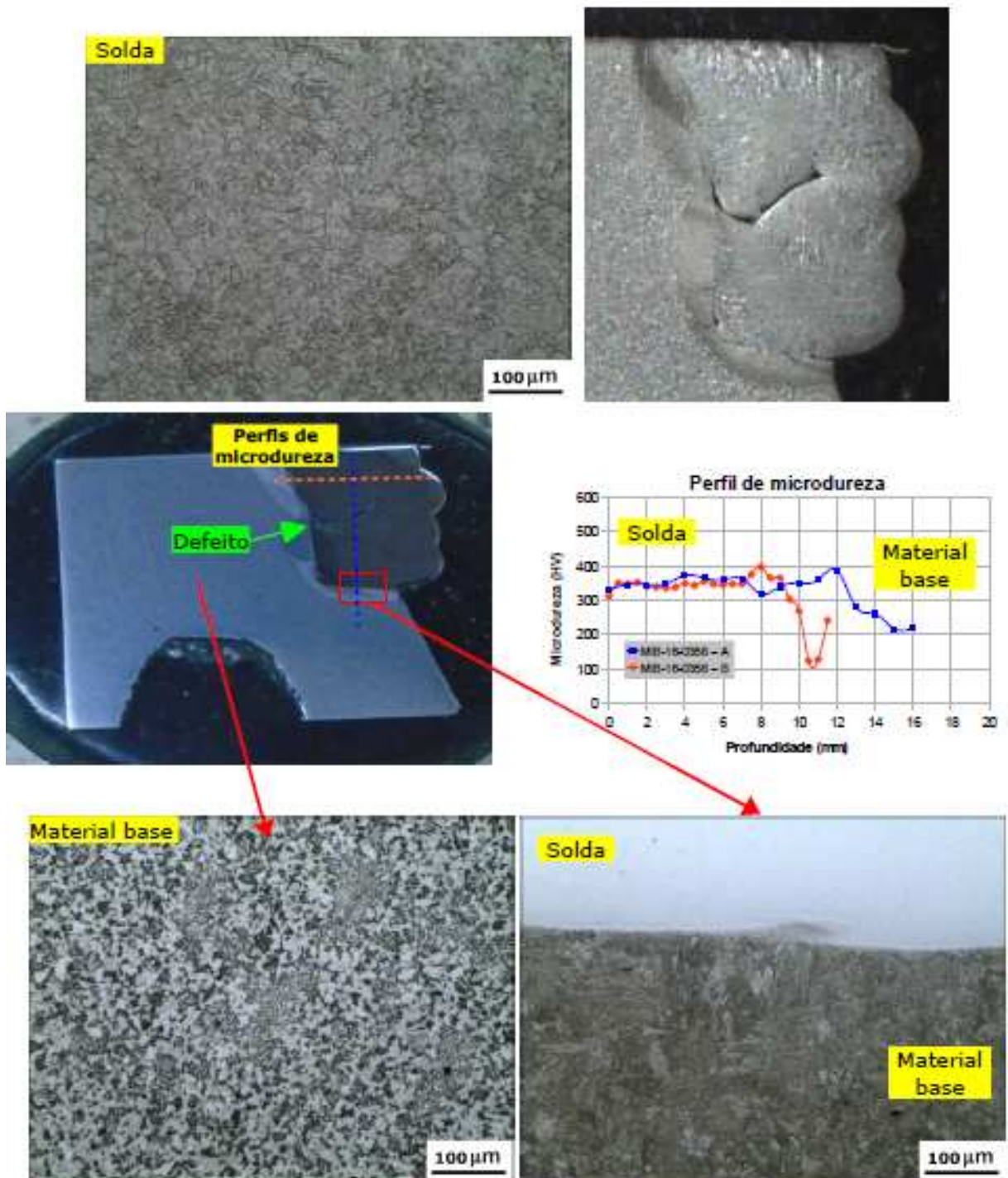


Figura 23 - Análise micrográfica óptica. Amostra MIB-16-0358 (sede A) e perfil de microdureza Vickers -A é o perfil vertical e B é o perfil horizontal (teste nº2).

Fonte: Relatório MIB 195-16, Pág 3.

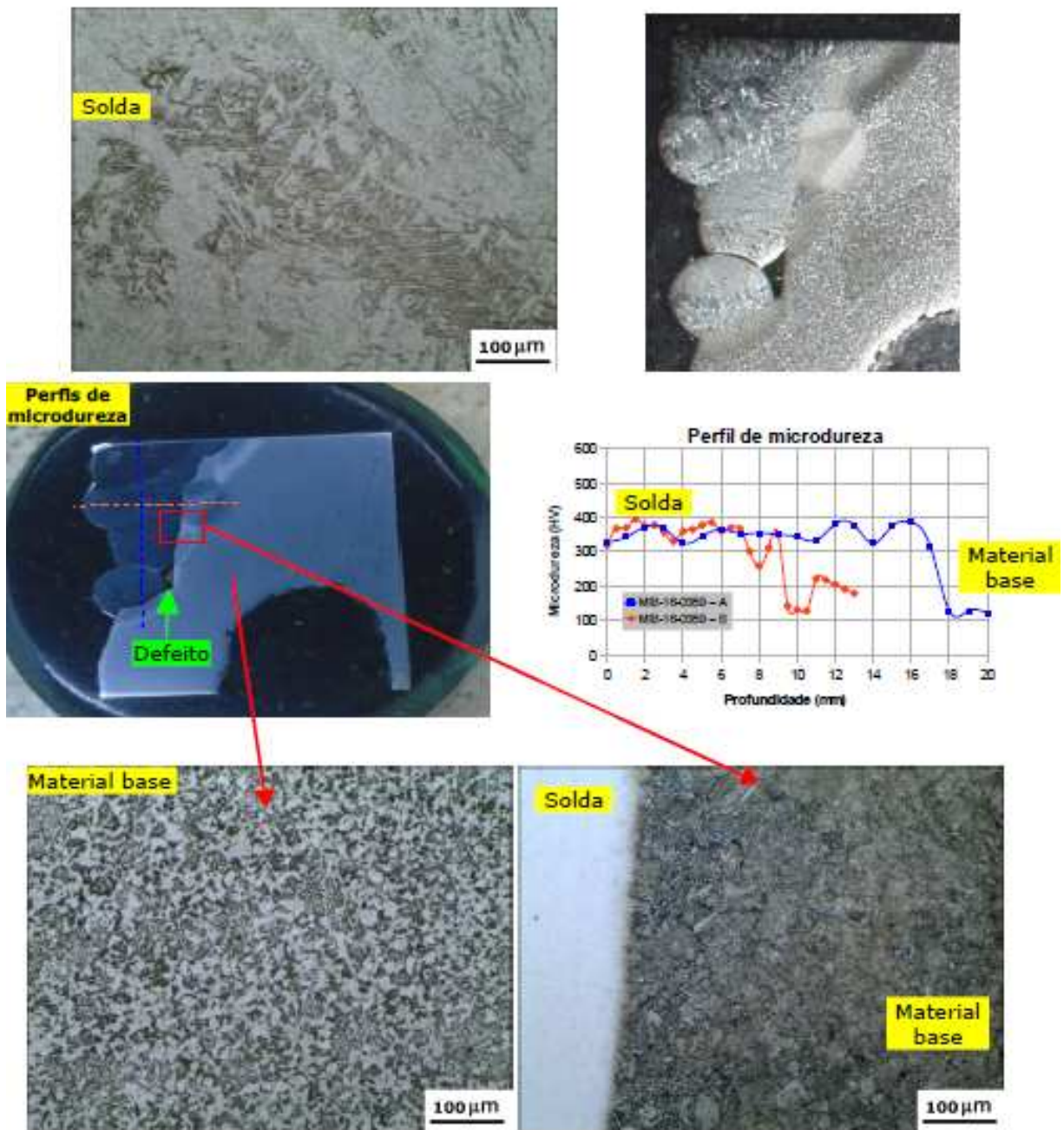


Figura 24 - Análise micrográfica óptica. Amostra MIB-16-0359 (sede B) e perfil de microdureza Vickers -A é o perfil vertical e B é o perfil horizontal (teste nº2).

Fonte: Relatório MIB 195-16, Pág 4.

5- CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante os testes práticos percebeu-se que o arco de soldagem não possui boas características quando a corrente está abaixo de 180A para o arame OK Autorod 410NiMo com bitola de 1,2mm. Para este valor de corrente a dureza da sede de válvula ficou ligeiramente abaixo do esperado (35-45HRC). Os valores de correntes empregados que apresentaram melhor característica visual do cordão de solda, melhor característica de arco, foram entre 175 e 200A. Para estes valores os resultados de dureza, microestrutura e composição química foram satisfatórios.

Os defeitos na solda (gota fria) citados no capítulo 4 não foram considerados críticos, visto que está é uma característica das soldas realizadas pelo fabricante do componente e não são causas de falha. Contudo é pertinente que uma solda não apresente tais defeitos. Para tratar este tipo de defeitos novas análises podem ser realizadas utilizando o consumível OK Autorod 410NiMo com 0,8mm de bitola e com valor de corrente mais próximo ao limite superior do consumível (120 a 140 A) ou a utilização de um processo de pré-aquecimento, como, por exemplo, aquecimento localizado com eletrodo TIG

O trabalho tem como resultado uma resposta ao objetivo proposto no capítulo de introdução, que é o consumível de soldagem (410 NiMo) e realizar testes práticos para reparar a sede de válvula de cabeçote de motor 7FDL.

A continuação deste trabalho será a aplicação de um cabeçote de motor diesel 7FDL reparada com o processo definido no 1º parágrafo deste capítulo.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BRACARENSE Q. A. Processos e equipamentos de soldagem – MPROC8A – Universidade Federal de Minas Gerais-2015.

BRACARENSE Q. A.; MONTEIRO A. R.; MENEZES R. H. P. Laudo LRSS nº009-2015. Análise de material de sede de válvula de motor ferroviário. Universidade Federal de Minas Gerais-2015.

CARUSO J. Informações Gerais sobre aços – CEFET-SP-2001.

Catálogo Arame Tubular ESAB. Disponível em www.esab.com.br. Acesso em 21/06/2016.

Informações institucionais MRS Logística S.a. Disponível em: <https://www.mrs.com.br>. Acessado em 10/05/2016.

MILAN. T.M. – Certificado nº 175-15 Rev. 1. Materials Institute of Brazil. São Carlos. 2015.

MILAN. T.M. – Certificado nº 374-15 Rev. 1. Materials Institute of Brazil. São Carlos. 2015.

MILAN. T.M. – Certificado nº 195-16 Rev. 1. Materials Institute of Brazil. São Carlos. 2016.

MODENESI P. Aços inoxidáveis e aços resistentes ao calor – MMAT01-15 - Universidade Federal de Minas Gerais-2015.

MODENESI P. Aços inoxidáveis e aços resistentes ao calor – MMAT02-15 - Universidade Federal de Minas Gerais-2015.

M ODENESI P. Soldabilidade de aços inoxidáveis - Universidade Federal de Minas Gerais-2014.

MODENESI P.; VILANI M. P. Soldagem 1 – Introdução aos Processos de Soldagem. Belo Horizonte-2006.

Handbook ASM – Volume 1 – Properties and Selection Iron Steels and High Performace Alloys – ASM International – 1993 – 2521 páginas.

WEINER E. Soldagem – Processos e Metalurgia – 1992.