

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE – FURG
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica
PPMec

Bruno Cesar Dalapé de Souza

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO BALÍSTICO DE UMA CHAPA DE
AÇO SAE 1020 SEM REVESTIMENTO E DE CHAPAS DE AÇO SAE 1020
REVESTIDAS COM AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO POR SOLDAGEM**

Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica

Rio Grande – RS

2018

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE – FURG
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica
PPMec

Bruno Cesar Dalapé de Souza

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO BALÍSTICO DE UMA CHAPA DE
AÇO SAE 1020 SEM REVESTIMENTO E DE CHAPAS DE AÇO SAE 1020
REVESTIDAS COM AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO POR SOLDAGEM**

Orientador: Professor Luciano Volcanoglo Biehl, Dr.

Rio Grande – RS

2018

ATA DA DEFESA

AGRADECIMENTOS

À minha amada esposa Bianca, meu “porto seguro”, por me motivar diariamente a encarar os desafios que me proponho a enfrentar.

Aos meus pais, Waldir (*in memorian*) e Magda, pela incansável dedicação à minha formação pessoal e profissional.

À minha irmã, Kalina, por toda a preocupação e torcida para o meu sucesso.

Aos professores Luciano e Jorge, por toda atenção e disponibilidade na orientação deste trabalho.

Ao técnico do laboratório de soldagem, Bruno Soares, pelo essencial apoio na execução desta pesquisa.

À Marinha do Brasil, pela oportunidade de realização deste trabalho.

À Estação Naval do Rio Grande, pelo apoio prestado ao longo deste período de estudos.

Ao Centro de Avaliações do Exército, pelo tratamento cordial e apoio prestado, viabilizando a execução do presente trabalho.

RESUMO

As Blindagens Balísticas empregadas em forças de segurança requerem resistência compatível ao poder de fogo utilizado pela criminalidade e, atualmente, diante do expressivo domínio do tráfico de drogas no país, armas de maior calibre, antes utilizadas exclusivamente por militares e policiais, estão nas mãos de qualquer bandido e, por isso, o desenvolvimento de novos materiais para blindagem faz-se necessário. Contudo, fatores como peso, manutenção e custo devem ser considerados por ocasião da aquisição de um escudo balístico, com base nas características do local a ser utilizado. A tradicional utilização dos diferentes tipos de aço para este fim se dá pela confiança e durabilidade deste tipo de material. Nesse contexto o presente trabalho avaliou o desempenho balístico nível III dos aços SAE 1020 sem revestimento e revestidos por soldagem, com aço de maior dureza. Foram analisadas três chapas de dimensões 500 mm X 500 mm, sendo: uma chapa de aço SAE 1020, com espessura de 12,70 mm; uma chapa de aço SAE 1020, com espessura de 6,35 mm, revestida com 5,05 mm de espessura, através de soldagem MIG/MAG utilizando arame eletrodo maciço ER 410; e uma chapa de aço SAE 1020, com espessura de 6,35 mm, revestida com 5,05 mm de espessura, através de soldagem MIG/MAG utilizando arame eletrodo maciço ER 410, submetida ao processo de revenimento a 180 graus celsius por 2 horas. Análises em MO, MEV e EDS foram feitas, assim como análise química e de microdureza. Os resultados apontaram que chapas de aço SAE 1020 com espessura iguais, ou superiores, a 12,7 mm são resistentes aos impactos balísticos de calibre 7,62 mm, apresentando o desempenho requerido para blindagem nível III. A chapa de aço SAE 1020, revestida e revenida, medindo 11,4 mm de espessura ao final do revestimento, resistiu parcialmente aos impactos. A chapa de aço SAE 1020, somente revestida, medindo 11,4 mm de espessura ao final do revestimento, não apresentou resultados adequados à aplicação balística.

Palavras-chave: Blindagem, Revestimento, Microestrutura, Aço inoxidável Martensítico.

ABSTRACT

Ballistic armor used in security forces requires compatible resistance to the firepower used by crime, and today, given the significant dominance of drug trafficking in the country, larger weapons, formerly used exclusively by military and police forces, are in the hands of any thug and, therefore, the development of new materials for shielding is necessary. However, factors such as weight, maintenance and cost must be considered when acquiring a ballistic shield, based on the characteristics of the place to be used. The traditional use of the different types of steel for this purpose is due to the reliability and durability of this type of material. In this context, the present work evaluated the level III ballistic performance of SAE 1020 uncoated and welded coated steels with harder steel. Three plates of dimensions 500 mm X 500 mm were analyzed, being: SAE 1020 steel plate, with a thickness of 12.70 mm; a SAE 1020 steel sheet, 6.35 mm thick, 5.05 mm thick, through MIG / MAG welding using solid electrode wire ER 410; and a 6.35 mm thick SAE 1020 steel sheet, coated with 5.05 mm thickness, by MIG / MAG welding using solid electrode wire ER 410, subjected to the annealing process at 180 degrees Celsius for 2 hours. Analyzes in MO, MEV and EDS were made, as well as chemical and microhardness analysis. The results indicated that SAE 1020 steel plates with thicknesses equal to or greater than 12.7 mm are resistant to ballistic impacts of 7.62 mm caliber, presenting the required performance for level III shielding. SAE 1020 steel sheet, coated and welded, measuring 11.4 mm thick at the end of the coating, partially withstood impacts. SAE 1020 steel sheet, only coated, measuring 11.4 mm thick at the end of the coating, did not present adequate results for the ballistic application.

Key words: Shielding, Coating, Microstructure, Martensitic stainless steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Escudo balístico a bordo dos navios da Marinha do Brasil	1
Figura 2- Dinâmica de disparo	6
Figura 3- Esquema de Blindagem mista	7
Figura 4- Critérios de falha	9
Figura 5- Comportamentos comuns em materiais.....	10
Figura 6- Estruturas após impacto balístico	14
Figura 7 - Diagrama de Fases do aço inoxidável AISI 410	16
Figura 8 - Diagrama TTT para o aço inoxidável AISI 410	17
Figura 9 – Microestruturas resultantes do resfriamento do aço AISI 410	18
Figura 10 - Diagrama de Balmforth	19
Figura 11- Efeito da temperatura de revenimento na dureza dos materiais	19
Figura 12 – Microestrutura do aço AISI 410 temperado e revenido	20
Figura 13 – Esquema de soldagem MIG/MAG	21
Figura 15 - Distorção em função do tempo de aquecimento e resfriamento	22
Figura 16 – Distorções básicas em juntas simples.....	23
Figura 17 – Distorções complexas em juntas simples.....	24
Figura 18- Fixação por calços	25
Figura 19- Fluxograma da metodologia do trabalho	26
Figura 20 – Equipamento Foundry-Master PRO	27
Figura 21 – Máquina de solda Fronius TransSynergic 5000	28
Figura 22 – Mecanismo de soldagem	28
Figura 23 – Equipamentos utilizados na caracterização microestrutural.....	29
Figura 24 – Máquina de corte utilizada	30
Figura 25 – Chapa com 12,7 mm de espessura.....	31
Figura 26 – Croqui da vista lateral do Dispositivo 1	32
Figura 27 – Dispositivo 1	32
Figura 28 – Dispositivo 1 reforçado por grampos.....	33
Figura 29 – Croqui da vista lateral do Dispositivo 2	34
Figura 30 – Dispositivo 2.....	34
Figura 31- Croqui da vista superior indicando a posição do centro do próximo cordão a ser depositado.....	35
Figura 32 - Forno LINN ELEKTRO THERM	36

Figura 33 - Arranjo para ensaio balístico.....	37
Figura 34 – Posicionamento e sequência dos disparos	38
Figura 35 – MEV modelo JEOL JSM 6610 LV	39
Figura 36 – Amostras prontas para análise.....	40
Figura 37 – Revestimento feito em fase de teste	43
Figura 38 – Microestrutura na interface solda/substrato	44
Figura 39 – Início do processo de revestimento.....	45
Figura 40 – Chapas revestidas não acabadas	46
Figura 41 – Chapas revestidas prontas para teste balístico.....	47
Figura 42 – Problemas na execução do revestimento	48
Figura 43 – Situação das chapas após o teste balístico	49
Figura 44 - Frente/Verso da chapa sem revestimento após o teste balístico	50
Figura 45 - Frente/Verso da chapa revestida/revenida após o teste balístico	51
Figura 46 - Frente/Verso da chapa revestida após o teste balístico.....	51
Figura 47 – Pontos de impacto em cada chapa	52
Figura 48 – Microestrutura na interface solda/substrato das chapas revestidas	54
Figura 49 – Microestrutura da interface solda/substrato	54
Figura 50 – Microestrutura da ZTA observada em MEV e análise química realizada por EDS.....	55
Figura 51 – Microestrutura do revestimento em cada chapa observadas em MO	56
Figura 52 – ZF próxima à interface solda/substrato da chapa revestida/revenida	57
Figura 53 – Microestrutura do substrato das chapas revstidas	57
Figura 55 – Perfil de microdureza da chapa revestida/revenida.....	58
Figura 54 – Perfil de microdureza da chapa revestida	59
Figura 56 – Perfil de microdureza das chapas revestidas	60
Figura 57 – Microestrura da região lateral ao tiro na chapa sem revestimento	61
Figura 58 – Microestrura da região frontal ao tiro na chapa sem revestimento	61
Figura 59 – Microestrura da região do tiro na chapa sem revestimento.....	62
Figura 60- Análise química da região do tiro	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação de blindagem balística.....	4
Tabela 2- Propriedades do material e seu papel no desempenho balístico	7
Tabela 3- Propriedades dos materiais utilizados no experimento	13
Tabela 4 - Composição química do aço inoxidável AISI 410.....	15
Tabela 5 - Composição química de consumíveis similares ao aço AISI 410	20
Tabela 6 – Composição química das chapas de aço	41
Tabela 7 – Composição química do arame eletrodo ER 410	42
Tabela 8 – Parâmetros de soldagem adotados	42
Tabela 9 – Valores de microdureza Vickers	44
Tabela 10 Características funcionais dos corpos de prova	48
Tabela 11 – Resultados do teste balístico.....	53
Tabela 12 – Microdureza da chapa sem revestimento por regiões	63

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

C	Carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
Cr	Cromo
Cr ₂₃ C ₆	Carboneto de Cromo
Fe	Ferro
Fe ₃ C	Carboneto de Ferro ou Cementita
HV 0,3	Microdureza Vickers com carga de 0,3 Kgf
M _f	Final da transformação martensítica
Mn	Manganês
M _s	Início da transformação martensítica
P	Fósforo
R	Revestimento
S	Enxofre
Si	Silício
α	Ferrita
°C	Graus Celsius

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
ASM	American Society for Metals
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAEX	Centro de Avaliações do Exército
EDS	Energy Dispersive Spectrometry
FURG	Universidade Federal do Rio Grande
HV	Microdureza Vickers
MAG	Metal Active Gas
MB	Metal Base
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MIG	Metal Inert Gas
MO	Microscopia Óptica
NBR	Norma Brasileira
SAE	Society of Automotive Engineers
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
ZF	Zona de Fusão
ZTA	Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1 JUSTIFICATIVA	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 OBJETIVOS GERAIS	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 CARACTERÍSTICAS DA BLINDAGEM BALÍSTICA	4
3.1.1 Critérios de penetração e modos de falha	8
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS EM SISTEMAS DE BLINDAGEM	11
3.3 APLICAÇÃO DE REVESTIMENTOS SOLDADOS EM BLINDAGEM BALÍSTICA	12
3.3.1 Comportamento dos aços AISI 410 quanto à soldagem e ao revenimento	14
3.3.2 Soldagem MIG/MAG aplicada em revestimentos	21
4 MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.1 ANÁLISE QUÍMICA DAS CHAPAS DE AÇO Sae 1020	27
4.2 TESTES INICIAIS PARA ESCOLHA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM E CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO REVESTIMENTO	27
4.3 CORTE DA CHAPA DE AÇO SAE 1020, COM 12,7 MM DE ESPESSURA, NAS DIMENSÕES PREVISTAS EM NORMA	29
4.4 CORTE DAS CHAPAS DE AÇO SAE 1020, COM 6,35 MM DE ESPESSURA, E APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO	31
4.5 ALÍVIO DE TENSÕES REALIZADO EM UMA DAS CHAPAS REVESTIDAS	35
4.6 TESTE BALÍSTICO	36
4.7 ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA	38
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
5.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA E ANÁLISES INICIAIS	41
5.2 APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO E REVENIMENTO	44
5.3 TESTE BALÍSTICO E ANÁLISES DOS CORPOS DE PROVA	48
6 CONCLUSÃO	64
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	65
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
9 BIBLIOGRAFIA	72

1 JUSTIFICATIVA

Com a nobre missão de preparar e empregar o Poder Naval a fim de contribuir para a defesa da Pátria, a Marinha do Brasil utiliza seus meios nas mais variadas situações de patrulha, exigindo de seus homens um alto grau de capacitação e treinamento. A fiscalização do tráfego aquaviário, através de inspeções navais e vistorias, é uma das diversas tarefas realizadas diariamente pela MB ao longo do litoral, rios e lagos do Brasil. Abordar embarcações é uma ação rotineira que oferece riscos aos militares inspetores expostos à criminalidade.

A segurança do pessoal militar é um requisito básico na operação das lanchas e dos diversos setores de um navio, que devem estar prontos para uma situação de engajamento. Neste contexto, destacam-se setores vulneráveis como os reparos para tiro de médio calibre, onde militares guarnecem metralhadoras fixadas no convés aberto de uma embarcação, protegidos apenas por um escudo feito de chapa de aço e por equipamentos de proteção individual, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1- Escudo balístico a bordo dos navios da Marinha do Brasil



Fonte: Defesa Aeronaval (2017)

Visto tamanha importância desses escudos, e no intuito de avaliar materiais com maior disponibilidade no comércio que possam desempenhar essa função, idealizou-se a realização de testes balísticos em uma chapa de aço com maior ductilidade e uma chapa de aço revestida, por soldagem, sendo composta por uma camada mais dúctil e outra camada com maior dureza. Para representar o aço

com maior ductilidade utilizou-se o aço SAE 1020, tendo em vista que este material é facilmente oferecido em diferentes espessuras, por preços relativamente baixos, no comércio. Devido à possibilidade de ser temperado ao ar após o processo de soldagem, o aço AISI 410 foi escolhido, através do eletrodo maciço ER 410, para representar o material de expressiva dureza a ser depositado.

Contudo, é salutar que após o processo de têmpera seja realizado um processo para alívio de tensões. A partir daí surgiu a idéia de confeccionar duas chapas mistas; uma com a camada de maior dureza temperada e outra com a camada de maior dureza temperada e revenida.

Sendo assim, vislumbrou-se, através deste estudo, a avaliação de três chapas quanto ao emprego balístico, sendo:

- Uma chapa de aço SAE 1020, com 12,70 mm de espessura;
- uma chapa de aço SAE 1020, com espessura de 6,35 mm, revestida com arame eletrodo maciço ER 410, através de soldagem MIG/MAG; e
- uma chapa de aço SAE 1020, com espessura de 6,35 mm, revestida com arame eletrodo maciço ER 410, através de soldagem MIG/MAG e submetida ao processo de revenimento.

A espessura de 12,70 mm, para a chapa de aço SAE 1020, foi adotada como referência, baseado na experiência do autor, onde foi constatado por ele que este material, com essa espessura, resistia a tiros de pistola. Contudo havia incerteza de sucesso quanto ao desempenho desse mesmo material quando submetido aos testes com fuzil.

As chapas de aço SAE 1020, utilizadas na confecção das chapas revestidas, tinham 6,35 mm de espessura, e receberiam revestimento com 6,35 mm de espessura, de modo que a soma das espessuras dos dois materiais diferentes resultassem no valor de 12,70 mm de espessura para cada chapa revestida. Desta forma, as duas chapas revestidas seriam justamente comparadas com a chapa de aço comum ao final dos testes.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho tem como objetivo, avaliar a viabilidade da aplicação de revestimentos por soldagem para confecção de escudos balísticos, através da comparação de desempenho entre três chapas de aço, submetidas à tiros de munição de calibre 7,62mm, em ensaio balístico apropriado, sendo elas: uma chapa de aço SAE 1020 com 12,70 mm de espessura; uma chapa de aço SAE 1020, com espessura de 6,35 mm, revestida com arame eletrodo maciço ER 410, através da soldagem MIG/MAG; e uma chapa de aço SAE 1020, com espessura de 6,35 mm, revestida com arame eletrodo maciço ER 410, através da soldagem MIG/MAG e submetida ao processo de revenimento,

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Em complemento aos objetivos gerais, ao longo deste trabalho foram realizados estudos qualitativos dos materiais utilizados que compõem os seguintes objetivos específicos:

- Analisar a composição química do substrato;
- Determinar as microestruturas do material base e do revestimento;
- Verificar as microestruturas no metal base, ZTA e ZF;
- Realizar análises em MO, MEV e EDS; e
- Realizar ensaio de microdureza.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CARACTERÍSTICAS DA BLINDAGEM BALÍSTICA

Blindagem balística é definida, segundo a norma da ABNT, NBR 15000, como sendo um anteparo de proteção projetado para oferecer resistência à penetração de projéteis provenientes de armas de fogo. A norma também classifica o sistema de blindagem, que pode ser opaco ou transparente, segundo níveis de proteção, conforme a Tabela 1. Observa-se que cada nível de blindagem relaciona os tipos de munição, a massa do projétil, a velocidade de impacto e o número de tiros que o corpo de prova deve suportar em teste.

Tabela 1- Classificação de blindagem balística

Nível	Munição	Massa do projétil (g)	V _o (m/s)	Número de impactos
I	.22 LRHV	2,6 ± 0,1	320 ± 10	5
	.38 Special RN Chumbo	10,2 ± 0,1	254 ± 15	
II-A	9 FMJ	8,0 ± 0,1	332 ± 12	5
	357 Magnum JSP	10,2 ± 0,1	381 ± 12	
II	9 FMJ	8,0 ± 0,1	358 ± 15	5
	357 Magnum JSP	10,2 ± 0,1	425 ± 15	
III-A	9 FMJ	8,0 ± 0,1	426 ± 15	5
	.44 Magnum SWC GC	15,6 ± 0,1		
III	7.62 X 51 FMJ (.308 - Winchester)	9,7 ± 0,1	838 ± 15	5
IV	.30-06 AP	10,8 ± 0,1	868 ± 15	1

Fonte: Adaptado de NBR 15000 (2005)

Com base nos tipos de munição apresentados na norma, é importante definir as seguintes siglas:

- LRHV (Long Rifle High Velocity) – Rifle de alta velocidade;
- JSP (Joint Soft Point) – Munição jaquetada com ponta macia, para munição de calibre .357;
- SW GC (Semi WadCutter Gas Check) - Ponta de semicanto-vivo. Munição de calibre .44 que tem uma ponta arredondada em um cilindro ligeiramente

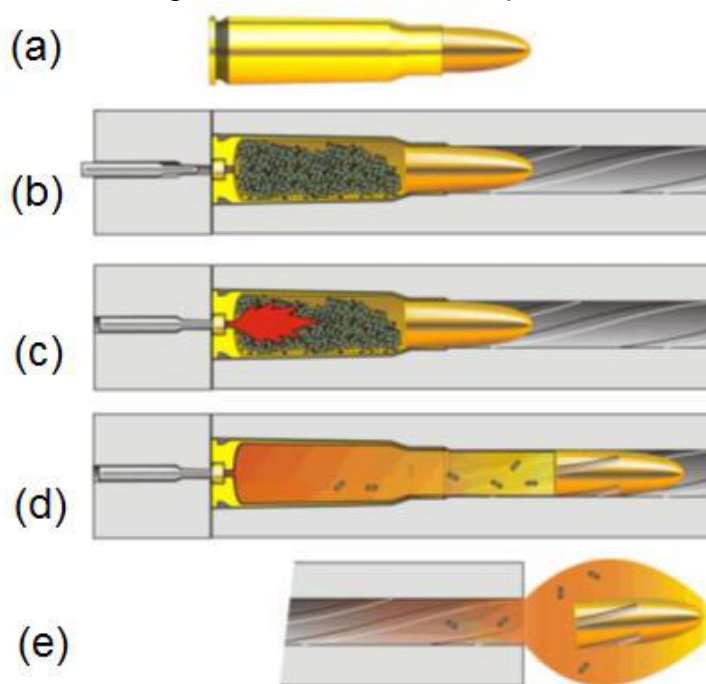
maior que a ponta, tornando o projétil mais aerodinâmico.

- RN (Round Nose) - Ponta redonda de chumbo. Semelhante ao FMJ, sendo constituído apenas de chumbo sem jaqueta de metal;
- FMJ (Full Metal Jacketed) – Munição totalmente jaquetada de metal. O projétil é completamente englobado pela jaqueta de metal, exceto na base; e
- AP (Armor Piercing) - Projéteis perfurantes, desenvolvidos para a penetração em blindagens pesadas com o mínimo de danos aos mesmos e com a expectativa de causarem o máximo de danos na placa metálica ou compósito. Tem como objetivo atingir superfícies duras, e apresentam uma forma pontiaguda para facilitar a penetração na blindagem balística. Normalmente são fabricados de aços com alta dureza e ligas de tungstênio.

A definição dos níveis de proteção segue basicamente a classificação da norma NIJ (National Institute of Justice – USA) Standard 0108.01, e preconiza que cada nível de proteção deve resistir ao impacto balístico gerado por determinadas munições que estão previstas, em função da massa do projétil, velocidade de impacto e do número de impactos absorvidos pela estrutura atacada. Nesse contexto, faz-se necessário conceituar os seguintes termos:

- Munição - É o artefato formado por cartucho, pólvora, espoleta e projétil;
- Calibre - Valor do diâmetro da base de uma munição, nomeando-a, podendo ser expresso em milímetros (quando determinado pelo sistema métrico) e em centésimos ou milésimos de polegada (quando determinado pelo sistema inglês ou norte-americano); e
- Projétil - Toda e qualquer massa arremessada por um dispositivo mecânico. A Figura 2 ilustra as fases presentes no disparo de um projétil, onde observam-se: (a) Munição; (B) Visualização da pólvora e da espoleta no Interior do cartucho; (c) acionamento da espoleta e deflagração da pólvora ; (d) Impulsão do projétil, ainda no cano da arma; e (e) Projétil iniciando sua trajetória.

Figura 2- Dinâmica de disparo



Fonte: Adaptado de Jussila (2005)

Para o cumprimento das especificações de proteção, e um desempenho balístico satisfatório, toda blindagem deve apresentar propriedades balísticas adequadas. Dentre as principais propriedades, destacam-se (SOUZA, 2014):

- Resistência ao choque – Propriedade que permite a absorção pelo alvo, sem fraturar, em tempo muito curto, a energia de impacto do projétil.
- Resistência ao estilhaçamento – Propriedade pela qual o alvo resiste ao aparecimento de trincas, fissuras ou esfoliações, em especial na face distal.
- Resistência à penetração – Propriedade que mede quanto o alvo impede a penetração parcial ou total do projétil. É oportuno observar a diferença entre penetração e perfuração. A perfuração possui o mesmo significado físico que uma penetração completa, e uma penetração é o mesmo que uma penetração parcial.

Segundo Silva et al. (2014), não se pode correlacionar efetivamente desempenho balístico a uma única característica ou propriedade do material, e apresenta algumas propriedades indicando seus efeitos no desempenho balístico. Através da Tabela 2, observa-se as referidas propriedades que o material, a ser utilizado em blindagem balística, deve ter.

Tabela 2- Propriedades do material e seu papel no desempenho balístico

Propriedade do material	Efeito no desempenho balístico
Densidade	Peso do sistema de proteção
Dureza	Dano ao projétil
Módulo de elasticidade	Propagação das ondas de tensão
Resistência mecânica	Resistência aos múltiplos impactos
Tenacidade à fratura	Resistência aos múltiplos impactos, durabilidade em campo
Modo da fratura (inter ou transgranular)	Absorção de energia

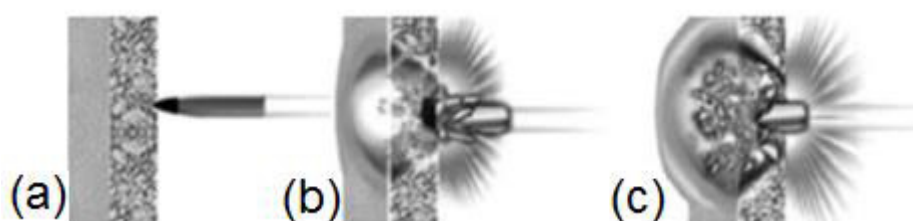
Fonte: Adaptado de Silva et al. (2014)

Atualmente, por apresentar resultados significativos, em relação ao desempenho balístico, a blindagem mista é amplamente utilizada. De acordo com Silva et al. (2014), a blindagem mista consiste na sobreposição de placas de diferentes materiais com objetivo de utilizar suas diferentes propriedades para garantir um melhor desempenho da blindagem. Com isso, no processo de resistência ao impacto de projétil com alta energia, são necessárias as seguintes propriedades:

- Dureza e alta resistência à compressão no início do impacto; e
- Resistência à flexão e ductilidade nos estágios finais.

Observam-se, através da Figura 3, os efeitos do impacto de um projétil com alta energia ao longo de uma blindagem mista composta com as referidas propriedades necessárias, onde: (a) antes; (b) durante; e (c) ao final do impacto.

Figura 3- Esquema de Blindagem mista



Fonte: adaptado de Silva et al. (2014)

Além das características mencionadas anteriormente, outros parâmetros influenciam o desempenho de uma blindagem, como por exemplo; espessura do alvo, ângulo de impacto, forma do projétil, temperatura de operação, densidade do projétil e do sistema blindado.

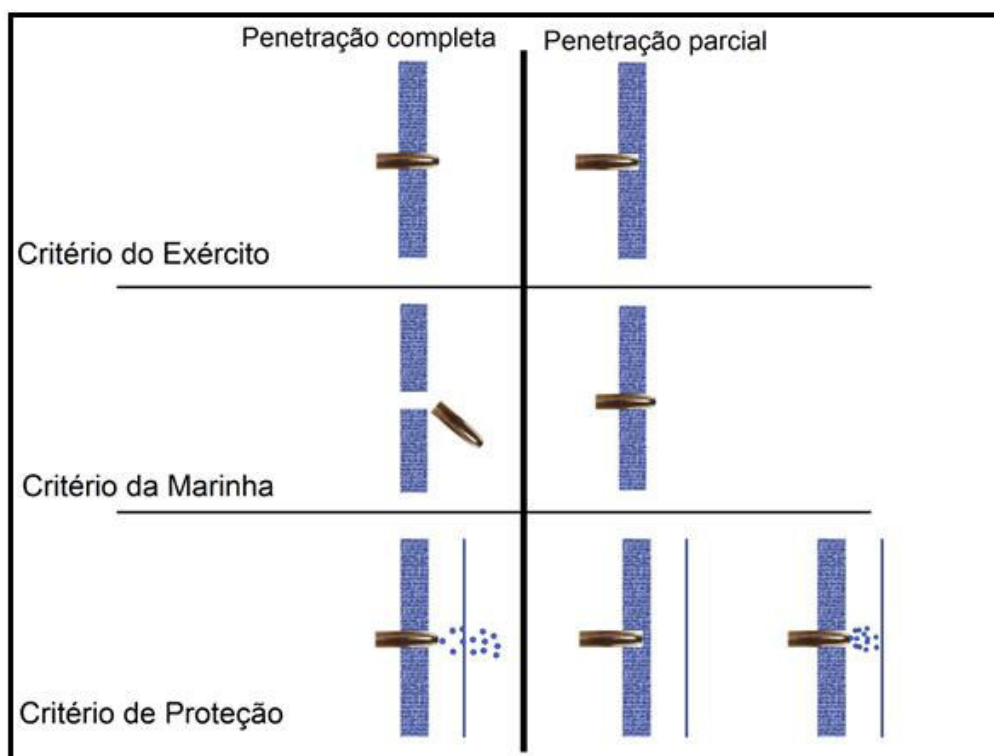
3.1.1 Critérios de penetração e modos de falha

De acordo com Shin (2017), as definições de perfuração e de penetração parcial do projétil, são baseiam-se em critérios, presentes nas avaliações de blindagem balística. São eles:

- Critério do Exército - Para caracterizar uma penetração completa, o projétil deverá transpassar a blindagem, permitindo a passagem de qualquer fonte de luz através do orifício produzido, ou também quando a estrutura blindada não é transpassada expondo à vista somente a ponta do projétil em sua face posterior;
- Critério da Marinha - A penetração completa deve ser considerada quando o projétil ou seus fragmentos possam ser identificados visualmente na face posterior da blindagem; e
- Critério de Proteção - A penetração completa ocorre quando a placa testemunha é perfurada pelo projétil, partes de seus fragmentos ou fragmentos da face posterior da blindagem. Este critério foi adotado para avaliação de blindagens opacas e transparentes, segundo a norma NBR 15000.

No desenvolvimento de blindagens, é importante especificar o critério adotado. A diferença entre tais critérios está ilustrada na Figura 4.

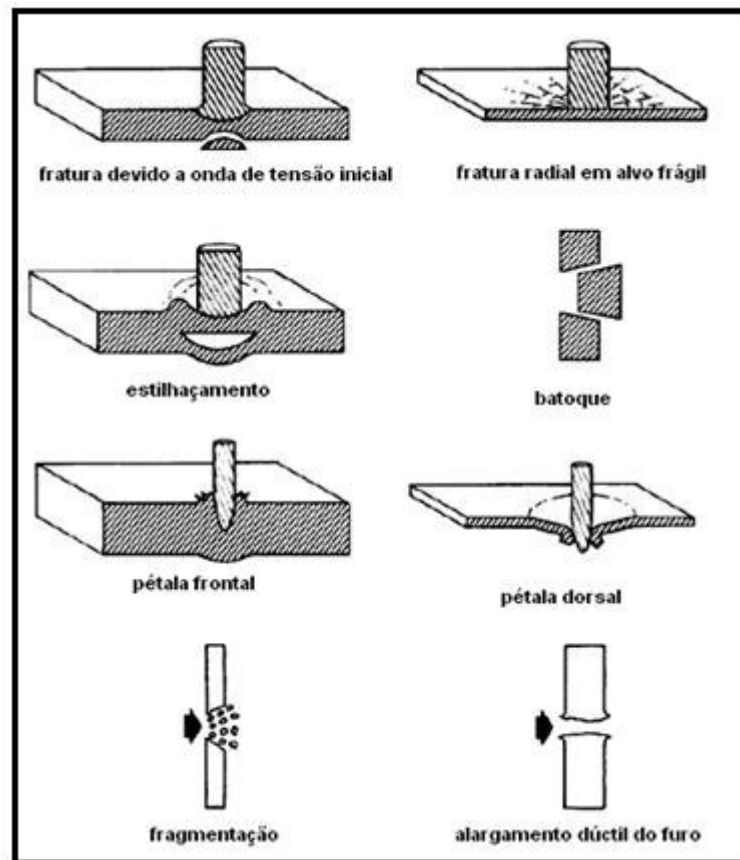
Figura 4- Critérios de falha



Fonte: Adaptado de Shin (2017)

As propriedades físicas e características do alvo e projétil, seu formato, o ângulo de incidência e a velocidade do impacto, bem como a espessura, exercem grande influência na determinação do tipo de penetração a ser obtida, seja completa ou parcial. Um projétil, ao impactar o alvo, poderá produzir no mesmo, uma deformação permanente ou até sua fratura. A Figura 4 ilustra alguns dos mecanismos de penetração mais frequentes (BACKMAN, 1978).

Figura 5- Comportamentos comuns em materiais



Fonte: Adaptado de Backman (1978)

Dos comportamentos apresentados, vale destacar a fratura por “batoque”, que é um exemplo de fratura bastante característico em alvos metálicos, onde uma porção do material do alvo (batoque) é extraída com aproximadamente o mesmo diâmetro do projétil, se movimentando juntamente com o projétil sua trajetória de perfuração. Durante o instante em que ocorre uma deformação plástica cisalhante, ocorre a geração de calor localizado e restrito a esta região do impacto, na qual tem um decréscimo na resistência do material.

Outro mecanismo de penetração recorrente em placas finas, impactadas por projéteis com pontas ogivais ou cônicas, em velocidades relativamente baixas, denominado “pétala”. Este mecanismo atua devido à existência de altas tensões de tração radial e circunferencial, geradas após a passagem da onda inicial. O mecanismo do tipo fragmentação característico dos materiais frágeis, ocorre devido à interação de ondas que produzem um estado de

tensão, responsável pela propagação das trincas internas, propiciando suas ramificações e, desta forma, conduzindo o material à uma subdivisão em diversas partes, proporcionalmente à energia de impacto. Por fim, o alargamento dúctil do furo ocorre devido à formação de bandas de deslizamento, localizadas na região adjacente ao local impactado, facilitando consequentemente a deformação plástica do material até sua ruptura.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS EM SISTEMAS DE BLINDAGEM

Tradicionalmente utilizado em blindagens balísticas, o aço pode ser empregado de forma homogênea, onde o material possui as mesmas propriedades ao longo da trajetória do projétil, ou ainda poder ser utilizado de forma não-homogênea, onde chapas com diferentes características são unidas de forma a apresentar a proteção desejada. Contudo, para Clérigo (2010), a escolha do melhor material a ser utilizado em sistemas de proteção balística é de extrema importância, pois deve atender a melhor mobilidade possível e a segurança dos seus utilizadores. Dentre os variados materiais analisados por ele, o aço continua a ser a opção mais utilizada para aplicações de defesa, apesar de sua elevada densidade ser frequentemente um grande inconveniente. Destaca também, a utilização de ligas de titânio também tem grande potencial, porém, a sua aquisição é relativamente dispendiosa. Já, para Sudhakar et al. (2015), as ligas de alumínio de alta resistência podem ser utilizadas, ou ainda, combinadas com cerâmica para aumentar a resistência balística.

Materiais poliméricos, tais como poliéster, poliamida, aramida, polietileno e polipropileno, também são bastante utilizados na indústria de material bélico. Tecidos poliméricos são empregados, desde a 2 Guerra Mundial, como blindagens balísticas, quer sob a forma de blindagens flexíveis (soft armor), quer sob a forma de blindagens rígidas (hard armor). Segundo Alves et al. (2004), Blindagens compósitas fabricadas com fibra de polietileno de altíssimo peso molecular (ultra-high molecular weight polyethylene – UHMWPE) são empregadas, face à sua baixa densidade e elevada tenacidade, em proteções pessoais (coletes e capacetes) e em blindagens de veículos de uso militar/civil.

A combinação de propriedades físicas e mecânicas qualificam as cerâmicas para aplicações em sistemas de proteção balística. Materiais cerâmicos

normalmente formam a primeira camada de um sistema de blindagem mista, recebendo o impacto inicial do projétil, e dissipando grande parte da energia cinética ao fragmentar o projétil. Os principais materiais cerâmicos para blindagem balística são a alumina, o carbetto de silício e o carbetto de boro. Segundo Silva et al. (2014), materiais cerâmicos têm sido considerados para aplicações de blindagem devido a sua baixa densidade, alta dureza, alta resistência à compressão e dureza. Conforme Yadav et al. (2006), a substituição de materiais metálicos por materiais cerâmicos garantiu muitas melhorias nas aeronaves, como redução de peso, que por sua vez implica em aumento da autonomia, capacidade de transporte, além, de maior capacidade de blindagem.

Segundo Junior et al. (2006), uma das combinações de grande eficiência contra munições perfurantes constitui-se em uma placa cerâmica colada a um laminado polimérico. Estes sistemas de blindagem possuem alta rigidez e resistência específica, com significativa redução de peso. A função da cerâmica em uma blindagem é fornecer um revestimento rígido, capaz de fragmentar e erodir a ponta do projétil, convertendo sua energia cinética em energia de fratura, diminuindo a quantidade de movimento e reduzindo a sua capacidade de penetração (relação peso). O laminado polimérico suporta a cerâmica e absorve a energia cinética residual do projétil e dos próprios fragmentos da cerâmica. Já para Gama et al. (2001), uma das formas de otimizar uma blindagem compósita é trabalhando na sua interface, ou seja, colocando no espaço entre a cerâmica e a placa de retaguarda (laminado polimérico) diferentes tipos de materiais visando à atenuação da onda de tensão ou de choque gerada pelo impacto balístico e consequentemente menor transmissão da mesma para a placa de retaguarda preservando a mesma de maiores danos.

Contudo, no contexto econômico atual do país, o custo de fabricação/manutenção é um importante fator de decisão no processo de aquisição. Para tanto, o local de operação da estrutura blindada e a facilidade na obtenção do sistema desejado devem ser avaliados de modo a não haver desperdício de recursos, pois materiais encontrados em larga escala no comércio tendem a apresentar custos reduzidos quando comparados à materiais específicos, que geralmente são obtidos por encomenda ou em comércio especializado.

3.3 APLICAÇÃO DE REVESTIMENTOS SOLDADOS EM BLINDAGEM BALÍSTICA

A utilização de revestimentos por soldagem, na confecção de blindagens balísticas, não é um processo usual, sendo baixa, a disponibilidade de estudos envolvendo esse tema. Contudo, Choo (1996) realizou experimentos, aplicando revestimento de alta dureza na construção de um sistema de blindagem de múltiplas camadas, e comparou o desempenho balístico entre:

- Uma estrutura composta pelo aço HY-100 como substrato, e duas camadas de revestimento utilizando uma liga de ferro branco hipereutético com alto teor de cromo (ferro fundido branco); e
- Uma estrutura composta pelo aço HY-100 como substrato, uma camada de revestimento utilizando uma liga de ferro branco hipereutético com alto teor de cromo (ferro fundido branco), e uma camada de revestimento com aço inoxidável SUS 309, que apresenta maior ductilidade.

A Tabela 3 apresenta a composição do metal base e dos materiais utilizados nos revestimentos.

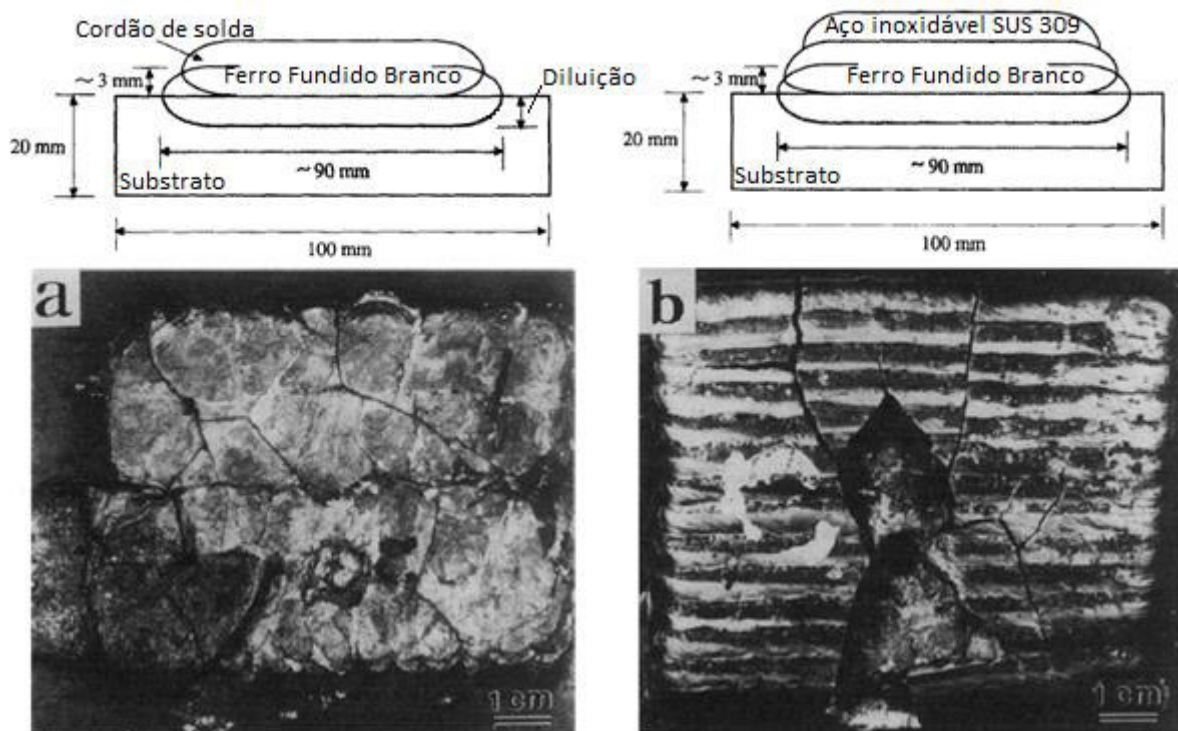
Tabela 3- Propriedades dos materiais utilizados no experimento

Tipo de liga	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	P	S	V
Alta liga de ferro branco	4,30	1,66	0,91	-	29,8	0,01	0,021	0,014	-
Aço inoxidável SUS 309	0,11	0,80	1,20	11,0	22,0	-	-	-	-
Aço HY-100	0,17	0,25	0,22	3,0	1,5	0,39	0,016	0,005	0,02

Fonte: Adaptado de Choo et al. (1996)

Observa-se, através da Figura 6, a configuração das estruturas após o teste balístico: (a) com dupla camada de ferro fundido branco; e (b) com uma camada de ferro fundido branco e uma camada com aço inoxidável. Nota-se que a estrutura com duplo revestimento utilizando ferro fundido branco obteve grande quantidade de material fragmentado e uma penetração relativamente rasa. Já a estrutura composta por uma camada de ferro fundido branco e uma camada com aço inoxidável, apresenta uma penetração mais profunda do projétil e menor quantidade de material fragmentado, resultando em maior absorção do impacto balístico.

Figura 6- Estruturas após impacto balístico



Fonte: Adaptado de Choo et al. (1996)

Revestimento por soldagem utilizando ligas de cromo com alta dureza geralmente estão associados ao termo “Hardfacing” que, por sua vez, é um processo de revestimento feito para aumentar a resistência mecânica de um material, ou metal base, mediante deposição de um metal de alta dureza na superfície do substrato, por soldagem. Este termo vale também para outros materiais que apresentam alto índice de dureza, utilizados em peças industriais ou matrizes, por proporcionarem elevada resistência ao desgaste.

3.3.1 Comportamento dos aços AISI 410 quanto à soldagem e ao revenimento

Os aços inoxidáveis martensíticos, segundo ASM (2005), são essencialmente ligas de ferro, cromo e carbono, sendo o teor de cromo na faixa de 10,5 a 18%, são ferromagnéticos, endurecíveis por tratamentos térmicos e geralmente só resistem à corrosão em ambientes pouco agressivos. Possuem estrutura cúbica de corpo centrado e quando endurecidos apresentam estrutura tetragonal de corpo centrado. O cromo e o carbono são equilibrados para garantir a

estrutura martensítica após o endurecimento. Excessos de carbonetos podem estar presentes para aumentar a resistência ao desgaste ou manter arestas cortantes. Elementos como o nióbio, silício, tungstênio e vanádio podem ser adicionados para modificar a temperabilidade. Ainda, pequenas quantidades de níquel podem ser adicionadas para melhorar a resistência à corrosão. Já o enxofre e o selênio, podem ser adicionados para melhorar a usinabilidade.

Este tipo de aço inoxidável pode alcançar elevados valores de dureza e limite de resistência mecânica, por outro lado apresentam trabalhabilidade e soldabilidade inferior as demais classes de aços inoxidáveis (SAWCZEN, 2014). O AISI 410 é o aço básico da família dos martensíticos e sua composição pode ser observada na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição química do aço inoxidável AISI 410

Elemento químico*	C	Mn	Si	Cr	P	S
Composição em peso percentual**	0,15	1	1	11,5 - 13,5	0,04	0,03

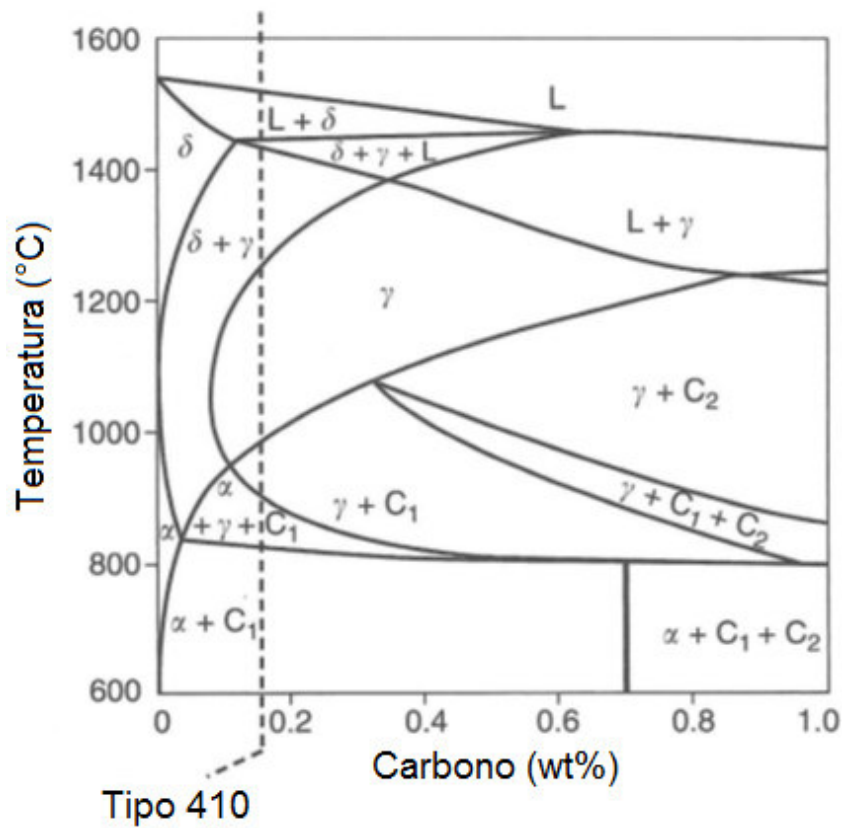
*Valor máximo, a menos que um intervalo seja mostrado

**O restante é de ferro

Fonte: Adaptado de ASM (1993)

A Figura 9 apresenta o diagrama pseudo-binário Fe-Cr-C, para 13% Cr, onde C1 refere-se aos carbonetos (Cr_{23}C_6) gerados. Para temperaturas inferiores a 800°C , a ferrita + Cr_{23}C_6 estão em equilíbrio. Os carbonetos C2, estão associados a ligas com mais de 0,3%C. Contudo, é importante observar que a microestrutura deste aço, com quantidade de carbono na faixa de 0,1 e 0,25%, é solidificada como ferrita e, posteriormente, é formada a austenita ou a mistura austenita + ferrita ao final da solidificação. No resfriamento da solda, abaixo do intervalo de equilíbrio, a austenita dá origem à martensita podendo haver ferrita residual na matriz martensítica, em função do balanço de elementos ferritizantes e austenitizantes (John et al., 2005).

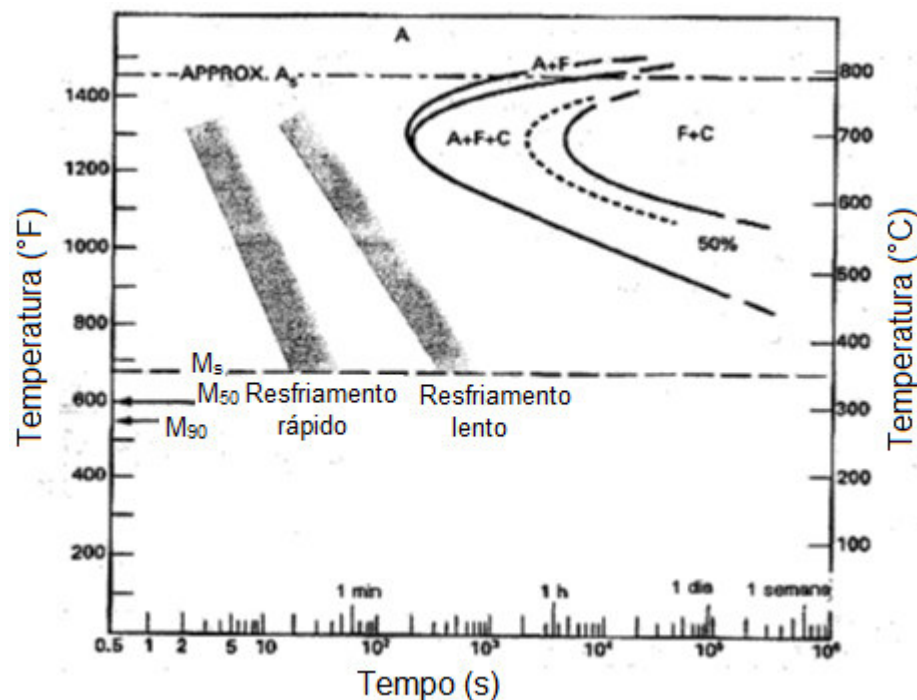
Figura 7 - Diagrama de Fases do aço inoxidável AISI 410



Fonte: Adaptado de John et al. (2005)

Assim como os aços ao carbono comum, os aços inoxidáveis martensíticos podem obter endurecimento por têmpera, e ainda apresentam teores de cromo suficientes para garantir endurecimento ao ar, mesmo para grandes espessuras. A Figura 8 ilustra este fato, que ocorre com o aço AISI 410, através do diagrama de transformação isométrica. É importante observar que o início da transformação martensítica ocorre na temperatura de 350°C, e é finalizado em temperaturas próximas e menores que 250°C. Sabe-se ainda que os elementos de liga e as condições de resfriamento podem influenciar essas temperaturas de transformação.

Figura 8 - Diagrama TTT para o aço inoxidável AISI 410



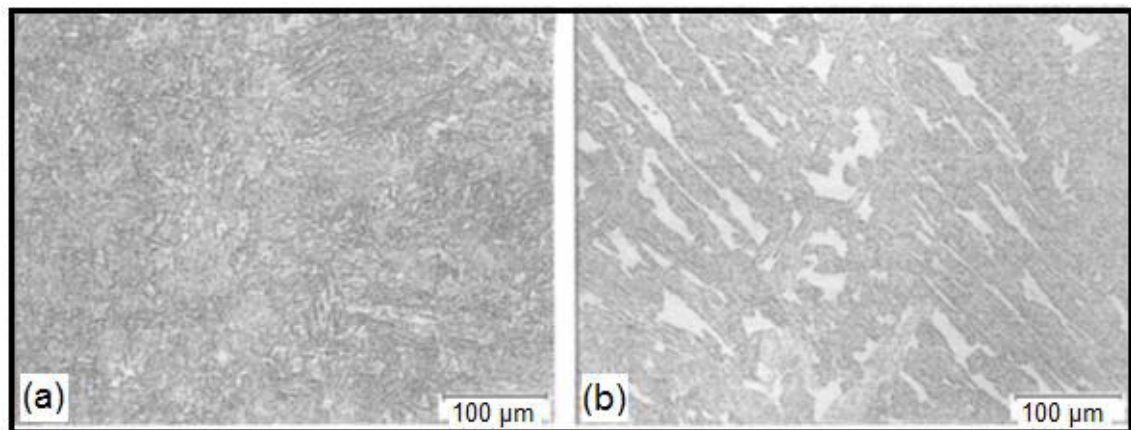
Fonte: Adaptado de ASM (1998)

Sabe-se ainda que a dureza deste aço está principalmente relacionada com o teor de carbono presente, sendo limitado à 0,6%C, pois maiores teores estão associados a formação de carbonetos primários, não oferecendo aumento significativo de dureza no material.

De acordo com Jonh at al. (2005), ocorrem diferentes dinâmicas, durante o processo de solidificação e resfriamento, do aço AISI 410. Destacam-se as seguintes sequências de transformações:

- O aço AISI 410 tem solidificação primária ferrítica, e a segregação de C e elementos de liga podem resultar na formação de A, ou numa mistura F+A, no final da solidificação. Enquanto a ZF esfria no estado sólido, a austenita consumirá a ferrita, resultando em estrutura totalmente austenítica a $T < 1200^{\circ}\text{C}$. No resfriamento subsequente a austenita se transformará em martensita, conforme pode ser observado através da Figura 10(a); e
- A ferrita não se transforma completamente em austenita em altas temperaturas, permanecendo na estrutura após o resfriamento, até a temperatura ambiente, conforme pode ser observado através da Figura 10(b).

Figura 9 – Microestruturas resultantes do resfriamento do aço AISI 410



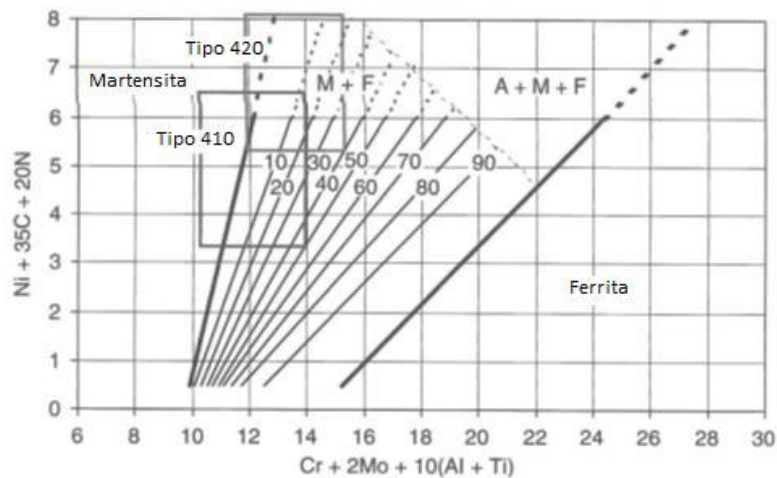
Fonte: John et al. (2005)

Contudo, a ferrita delta é considerada uma fase indesejável na microestrutura dos aços inoxidáveis martensíticos haja vista a mesma poder influenciar no desempenho da resistência à fadiga, tenacidade e corrosão sob-tensão (HENKE, 2013). A ferrita δ é resultante da participação de elementos “promotores da ferrita”, mormente o Cr, durante a solidificação e processamento termomecânico (Lippold e Kotecki, 2005).

A presença da ferrita delta, dependerá das condições de soldagem que controlam a velocidade de resfriamento. Ou seja, quanto menor for a energia de soldagem, maior será a velocidade de resfriamento, assim terá menor diluição e uma menor quantidade de ferrita delta SILVA (2011, apud Modenesi, 2001a ; Brooks & Thompson, 1991).

Neste contexto, é possível prever os percentuais de ferrita na composição da amostra, através do diagrama de Balmforth, com base na quantidade de determinados elementos químicos presentes no material. Este diagrama é apresentado na Figura 11.

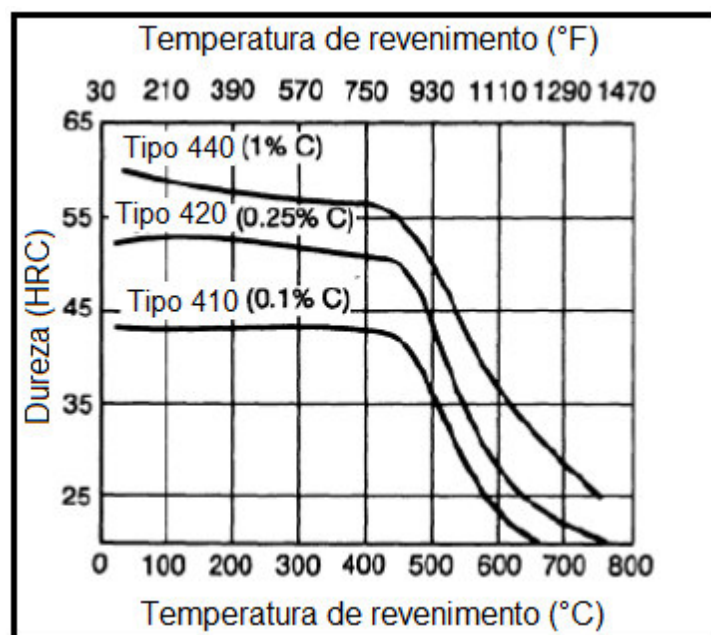
Figura 10 - Diagrama de Balmforth



Fonte: John et al. (2005)

Após sua solidificação, o aço AISI 410 pode ser submetido ao processo de revenimento, de modo a aumentar sua tenacidade, além de melhorar outras propriedades mecânicas. Contudo, em relação à dureza do material, os valores começam a sofrer decréscimos, em temperaturas acima de 400°C, conforme pode ser observado na Figura 12.

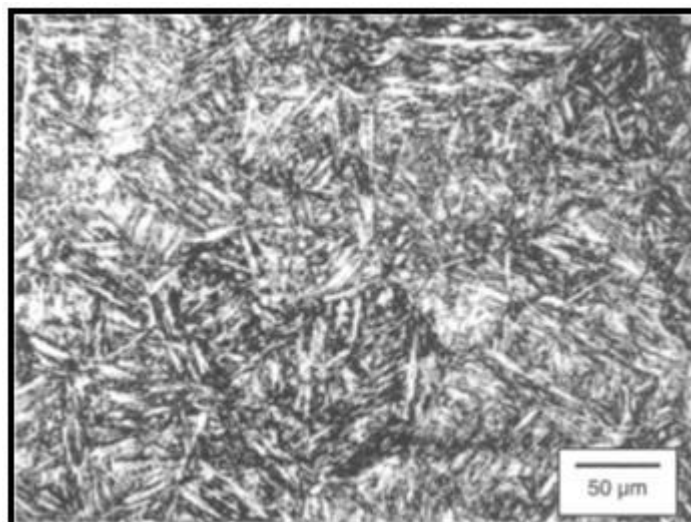
Figura 11- Efeito da temperatura de revenimento na dureza dos materiais



Fonte: AWS (1998)

A Figura 13 apresenta a microestrutura do aço AISI 410 após os processos de têmpera e revenimento.

Figura 12 – Microestrutura do aço AISI 410 temperado e revenido



Fonte: John et al. (2005)

Existem materiais similares ao aço AISI 410, utilizados como metais de adição para soldá-lo, que apresentam resistência mecânica de boa qualidade na ZF/ZTA, e responde bem aos tratamentos térmicos. Através da Tabela 5, alguns exemplos desses consumíveis podem ser observados.

Tabela 5 - Composição química de consumíveis similares ao aço AISI 410

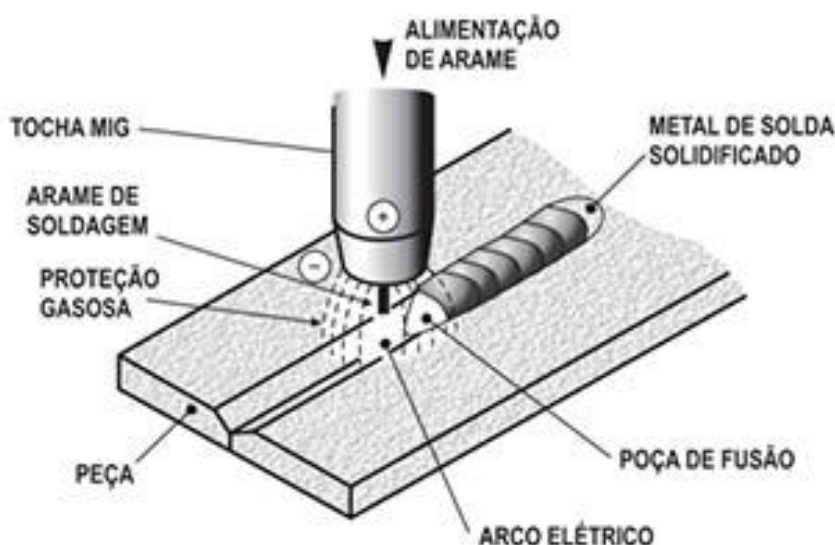
Composição*								
Classificação	UNS No	C	Cr	Mn	Si	Ni	Mo	Metal Base
E410-XX	W41010	0,12	11,0 - 13,5	1	0,9	0,7	0,75	410, CA-15
ER410	S41080	0,12	11,5 - 13,5	0,6	0,5	0,6	0,75	410, CA-15
E410TX-X	W41031	0,12	11,0 - 13,5	0,6	1	0,6	0,5	410, CA-15
E410NiMo-XX	W41016	0,06	11,0 - 12,5	1	0,9	4,0-5,0	0,40 - 0,70	410NiMo, CA-6NM
ER410NiMo	S41086	0,06	11,0 - 12,5	0,6	0,5	4,0-5,0	0,40 - 0,70	410NiMo, CA-6NM
E410NiMoTX-X	W41036	0,06	11,0 - 12,5	1	1	4,0-5,0	0,40 - 0,70	410NiMo, CA-6NM
ER420	S42080	0,25-0,40	12,0 - 14,0	0,6	0,5	0,6	0,75	420
*Valor máximo, a menos que um intervalo seja mostrado								

Fonte: Adaptado de AWS (1998)

3.3.2 Soldagem MIG/MAG aplicada em revestimentos

O processo de soldagem MIG/MAG, ou processo GMAW, se baseia na fonte de calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de um arame consumível, alimentado continuamente, e a peça a soldar. A proteção da região da solda é feita por uma atmosfera protetora de gás inerte (comercialmente, Ar e He) ou ativo (usualmente CO₂) ou misturas deles (no caso podendo incluir como gás ativo o O₂ e o N₂). A sigla MIG significa Metal Inert Gas (proteção por um gás, ou mistura, inerte), MAG significa Metal Active Gas (mistura de um ou mais dos gases ativos com gases inertes ou o CO₂ puro), e a sigla GMAW (Gas Metal Arc welding) significa soldagem ao arco elétrico com atmosfera de proteção gasosa e alimentação contínua de arame, de acordo com SILVA (2015, apud Scotti e Ponomarev 2008).

Figura 13 – Esquema de soldagem MIG/MAG



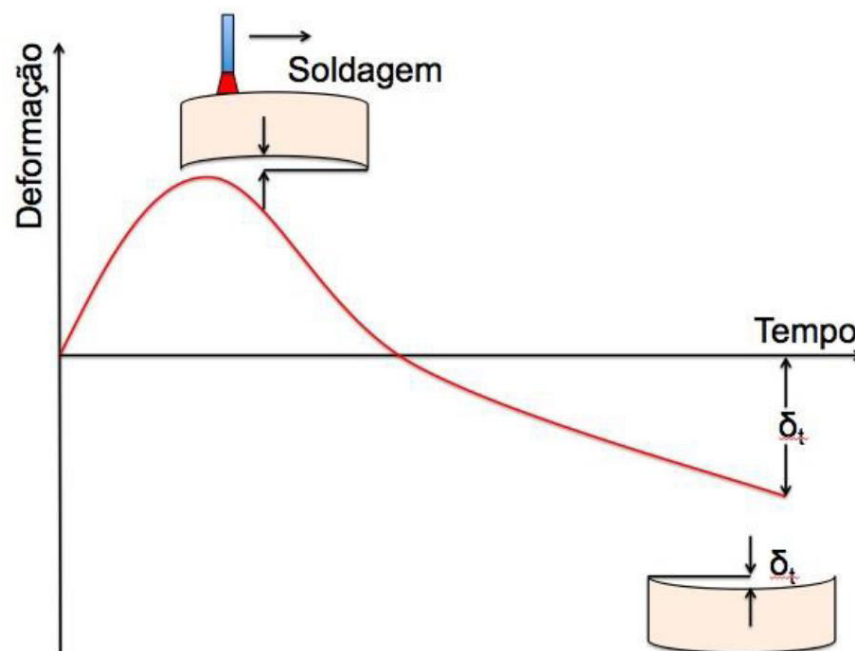
Fonte: Esab, 2005

Dentre as variáveis deste processo de soldagem, destaca-se a escolha do gás de proteção, pois para aplicação em aços inoxidáveis é recomendada a utilização do Argônio puro, podendo ser misturado com pequenas porcentagens de oxigênio ou dióxido de carbono (Ferreira et al. 2013). As adições de CO₂ em argônio para a soldagem de aços inoxidáveis é desaconselhada, de modo a evitar problemas referentes à corrosão intergranular (Gottardo et al. 2007).

Porém, a quantidade de CO_2 no gás de proteção pode influenciar características do cordão de solda, como molhabilidade e diluição. No estudo de ZILIO, et al., (2014) foi avaliado o desempenho de alguns gases de proteção quanto à molhabilidade do cordão de solda, utilizando o arame eletrodo ER 316LSi (aço inoxidável) para revestir aço carbono, e observaram que o aumento do teor de CO_2 no gás de proteção resultou no aumento da molhabilidade, juntamente com o aumento de diluição dos cordões de solda.

Sobre as consequências do processo de soldagem, destaca-se a distorção do material, pois resulta das tensões térmicas desenvolvidas durante a soldagem, alterando a forma e as dimensões das peças soldadas. A Figura 16 apresenta a dinâmica da distorção de uma peça em função do tempo de aquecimento e resfriamento.

Figura 14 - Distorção em função do tempo de aquecimento e resfriamento



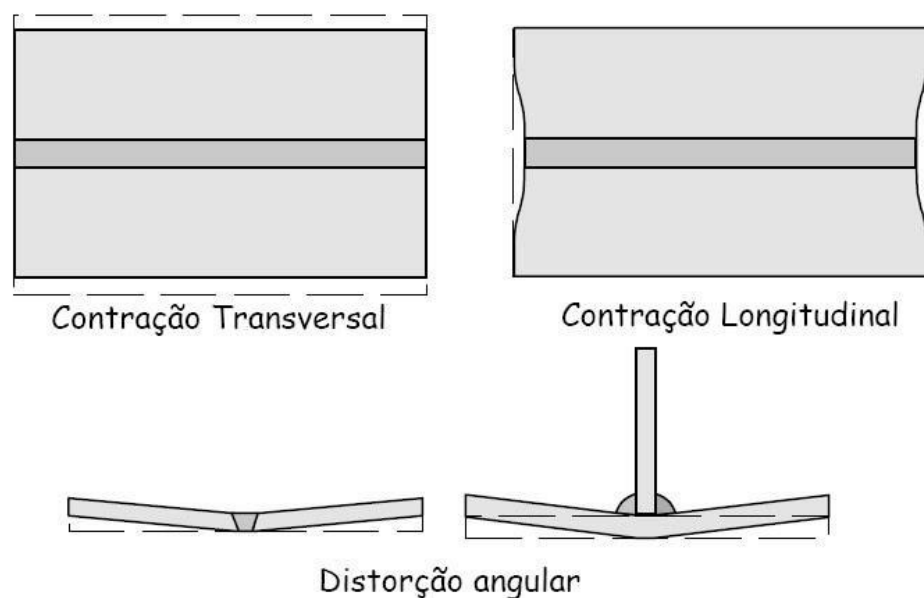
Fonte: SILVA, (2015, apud MODONESI 2001)

A soldagem ocasiona um alto aquecimento localizado dos metais a serem unidos e a distribuição de temperatura não é uniforme. De maneira geral, o metal de solda e a ZTA estão a temperaturas acima do metal de base não afetado. Durante o resfriamento, a poça de fusão contrai e solidifica, gerando tensões ao redor do

cordão de solda e da ZTA. Se as tensões produzidas pela expansão térmica e contração excederem o limite de escoamento do metal base, ocorrem deformações plásticas localizadas. A deformação plástica resulta em mudanças nos componentes dimensionais e distorce a estrutura definitivamente. Quando a poça solidifica e contrai, provoca tensões que podem gerar distorções quando a estrutura está livre ou tensões residuais quando a estrutura é restringida por algum elemento de fixação.

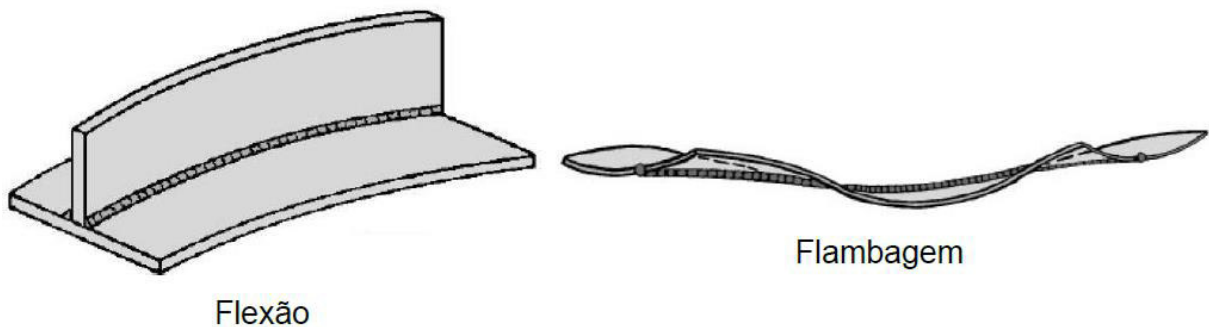
SILVA (2015) apresenta três tipos de distorções básicas em juntas simples, vistos na Figura 16, que causam distorções mais complexas, vistas na Figura 17. A abordagem desses efeitos é importante, pois podem ocorrer também em processos de revestimento por soldagem.

Figura 15 – Distorções básicas em juntas simples



Fonte: SILVA (2015)

Figura 16 – Distorções complexas em juntas simples

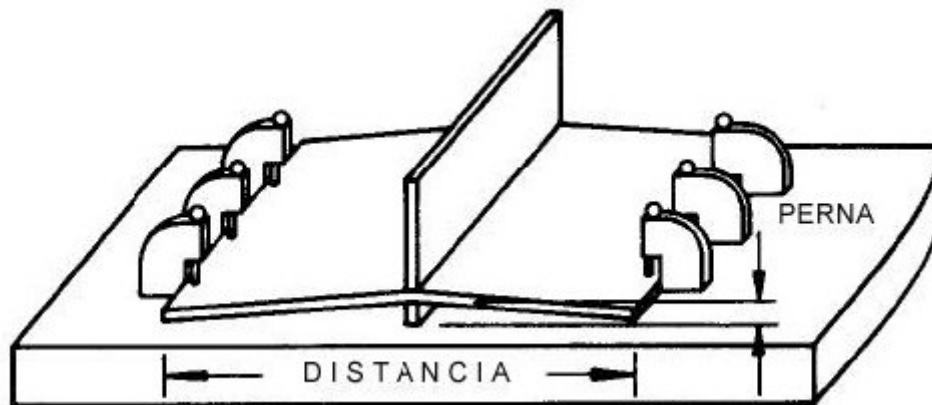


Fonte: SILVA (2015)

Segundo Silva (2015), o efeito da distorção pode ser minimizado durante o processo de fabricação das seguintes maneiras:

- Estimar a distorção que ocorrerá na estrutura e posicionar as peças de forma a compensar esta distorção, difícil de aplicar em estruturas complexas;
- Usar sequência de deposição de cordões de solda (deposição por partes, uso de mais de um soldador iniciando a operação no mesmo ponto e soldando em direções opostas) e de montagem (montagem por subcomponentes, etc.) que minimizem a distorção;
- Usar técnicas ativas de controle da distorção. Em geral, estas técnicas usam, durante a soldagem, fontes adicionais de aquecimento (e de resfriamento) de forma a gerar tensões térmicas adicionais capazes de contrabalancear as tensões geradas pela soldagem e, desta forma, reduzir a distorção. Um exemplo desta técnica envolve o emprego de fontes de aquecimento (maçaricos) colocadas lateralmente e deslocando-se junto com a tocha de soldagem; e
- Colocar peças na posição correta, ou próximo desta, e utilizar dispositivos de fixação ou outras técnicas para aumento da restrição das peças ao movimento. A Figura 17 exemplifica uma peça fixada, na posição de soldagem, por calços.

Figura 17- Fixação por calços

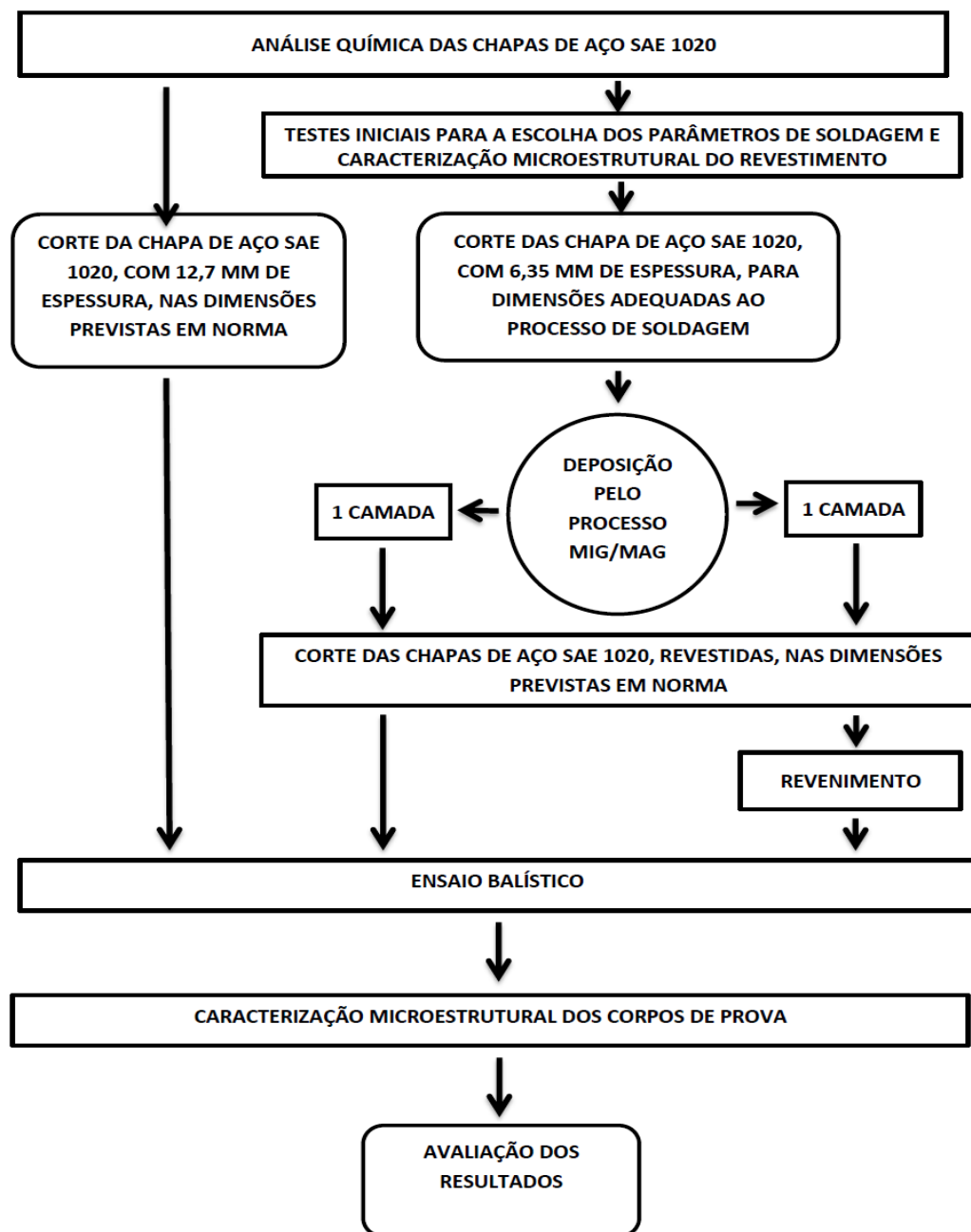


Fonte: Soares (2006)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para melhor elucidar a dinâmica dos experimentos e suas análises, é importante conhecer todas as etapas de execução deste estudo, que são abordadas no texto conforme a representação em fluxograma apresentado na Figura 18.

Figura 18- Fluxograma da metodologia do trabalho



Fonte: Próprio autor

4.1 ANÁLISE QUÍMICA DAS CHAPAS DE AÇO SAE 1020

Primeiramente, após aquisição das chapas de aço SAE 1020 no comércio local, foram realizadas análises, através do espectrômetro de emissão ótica Foundry-Master PRO, para verificar a composição química desses materiais. Observa-se o equipamento utilizado através da Figura 19.

Figura 19 – Equipamento Foundry-Master PRO



Fonte: Site do fabricante

4.2 TESTES INICIAIS PARA ESCOLHA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM E CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO REVESTIMENTO

Para a definição dos parâmetros do revestimento, a geometria do cordão de solda foi a principal característica analisada. O que se desejava de fato era um cordão espesso com pouca penetração, assim o revestimento seria feito mais rapidamente, afetando o mínimo possível, as propriedades de cada camada da chapa mista. O tipo de soldagem MIG/MAG foi adotado por ser um processo que pode ser facilmente automatizado, evitando assim erros de manuseio do

equipamento. A máquina de solda Fronius TransSynergic 5000, observada na Figura 20, foi utilizada na execução deste trabalho.

Figura 20 – Máquina de solda Fronius TransSynergic 5000



Fonte: Site do Fabricante

Um mecanismo, composto por um trilho com suporte para a tocha e controle de velocidade, foi utilizado para manter a velocidade de soldagem e o alinhamento do cordão de solda, conforme pode ser observado na Figura 21.

Figura 21 – Mecanismo de soldagem



Fonte: Próprio autor

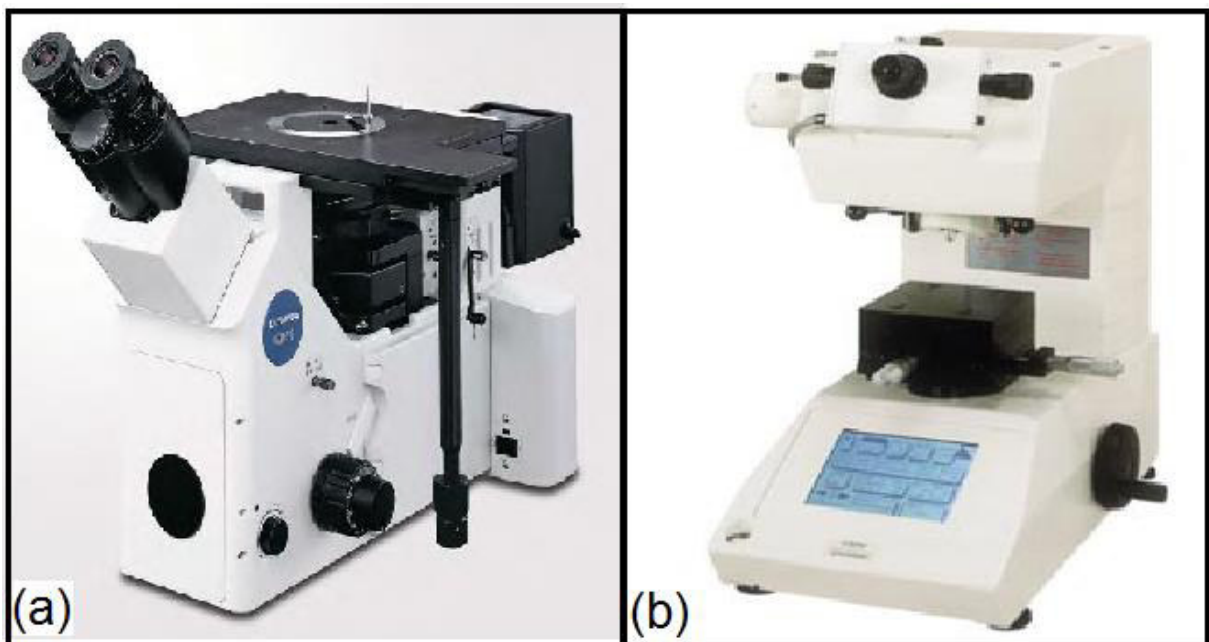
O arame eletrodo maciço, ER 410, da marca MJV SOLDAS, com diâmetro de 1 mm, foi escolhido com base na sua disponibilidade em estoque, no laboratório de soldagem da FURG.

Após a realização do revestimento, foram realizadas as seguintes análises:

- Avaliação de adesão do revestimento feita através de macroataque e visualização por lupa;
- Avaliação microestrutural feita no microscópio ótico OLYMPUS GX-AN360. Este equipamento pode ser observado através da Figura 23(a); e
- Ensaio de microdureza, feita através do microdurômetro HMV2 SHIMADZU. Este equipamento pode ser observado através da Figura 23(b).

Cabe destacar que a preparação metalográfica das amostras observadas nesta análise inicial, foi feita da mesma forma que foi realizada na fase de análise dos corpos de prova, descrita após a metodologia de aplicação dos testes balísticos.

Figura 22 – Equipamentos utilizados na caracterização microestrutural



Fonte: Site dos respectivos fabricantes

4.3 CORTE DA CHAPA DE AÇO SAE 1020, COM 12,7 MM DE ESPESSURA, NAS

DIMENSÕES PREVISTAS EM NORMA

Uma vez definidos os materiais a serem utilizados, as ferramentas de análise e todos os parâmetros aplicáveis ao revestimento, iniciou-se a fase de execução deste projeto, que envolveu diversos recursos, apoio de profissionais e de outras instituições para que pudesse ser realizado.

As dimensões dos corpos de prova balísticos foram definidas de acordo com o preconizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da NBR 15000. Pela norma, as dimensões de cada corpo de prova deve ser de 500mm X 500mm, sendo assim, a chapa com 12,7 mm foi cortada nas dimensões padronizadas pela norma, através da máquina HYPERTHERM, modelo POWERMAX 1650 G3, ficando pronta para ser utilizada no teste balístico.

Observa-se, através da Figura 25, a máquina utilizada para o corte dessa chapa, sendo utilizada também nos cortes das demais chapas utilizadas neste trabalho.

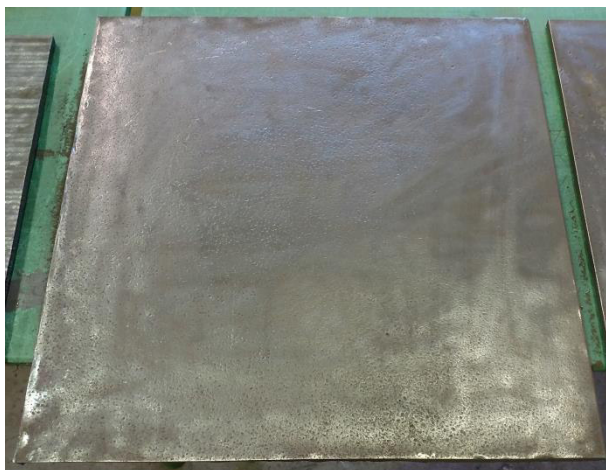
Figura 23 – Máquina de corte utilizada



Fonte: Site do Fabricante

A Figura 26 apresenta a chapa com 12,7 mm de espessura, pronta para a realização do teste balístico.

Figura 24 – Chapa com 12,7 mm de espessura



Fonte: Próprio autor

4.4 CORTE DAS CHAPAS DE AÇO SAE 1020, COM 6,35 MM DE ESPESSURA, E APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO

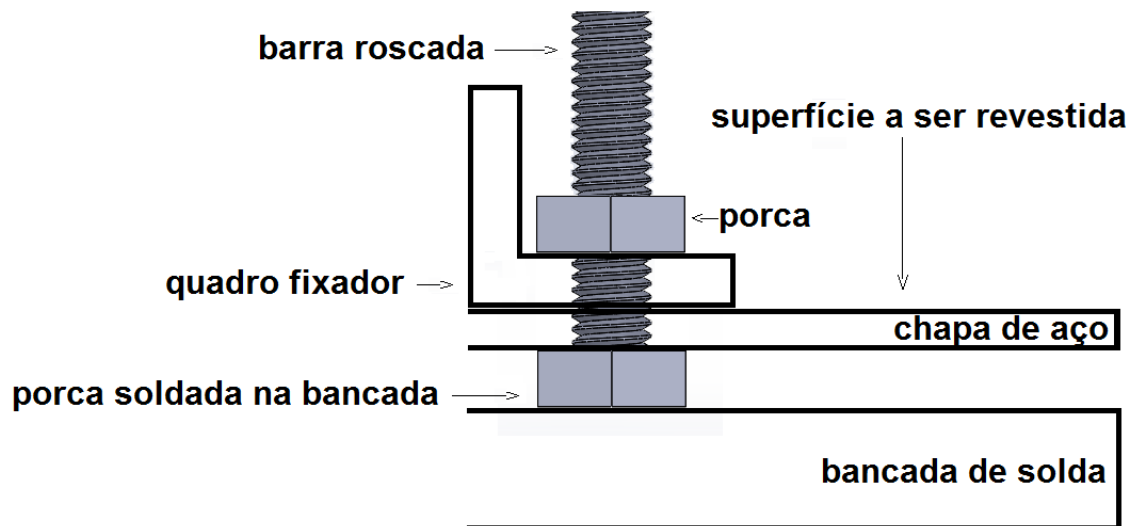
As chapas, de aço SAE 1020 com 6,35 mm de espessura, foram cortadas com dimensões de 750 mm X 750 mm, para que, após o processo de revestimento, fossem adequadas às dimensões padronizadas pela norma, descartando assim as regiões distorcidas e as imperfeições referentes ao desalinhamento no início e no fim dos cordões de solda.

No intuito de manter a posição da chapa, e minimizar distorções causadas pelos ciclos térmicos existentes no processo de deposição por soldagem, um quadro fixador foi confeccionado e utilizado de duas formas diferentes, dando origem aos seguintes dispositivos:

➤ Dispositivo 1 – Para a fabricação da primeira chapa revestida, foram feitos 12 furos equidistantes no quadro fixador e 12 furos em cada chapa, em posições coincidentes aos furos do quadro fixador. Além disso, 12 pedaços de barra roscada foram acoplados em porcas e o conjunto (barra + porca) foi soldado à mesa, em posições coincidentes aos furos das chapas e do quadro fixador. Após isso, a chapa foi encaixada no dispositivo, o quadro fixador foi encaixado por cima da

chapa, e por fim todo o sistema foi fixado por porcas na parte superior do conjunto. A Figura 27 ilustra parte da vista lateral do dispositivo e a Figura 28 apresenta o dispositivo pronto para ser revestido.

Figura 25 – Croqui da vista lateral do Dispositivo 1



Fonte: Próprio autor

Figura 26 – Dispositivo 1



Fonte: Próprio autor

No decorrer do processo de soldagem, algumas barras roscadas se quebraram, por cisalhamento, devido ao efeito de distorção. Por isso, o quadro

fixador teve que ser reforçado com a utilização de grampos tipo C. Através da Figura 29, observa-se o dispositivo de soldagem com grampos para reforçar a fixação.

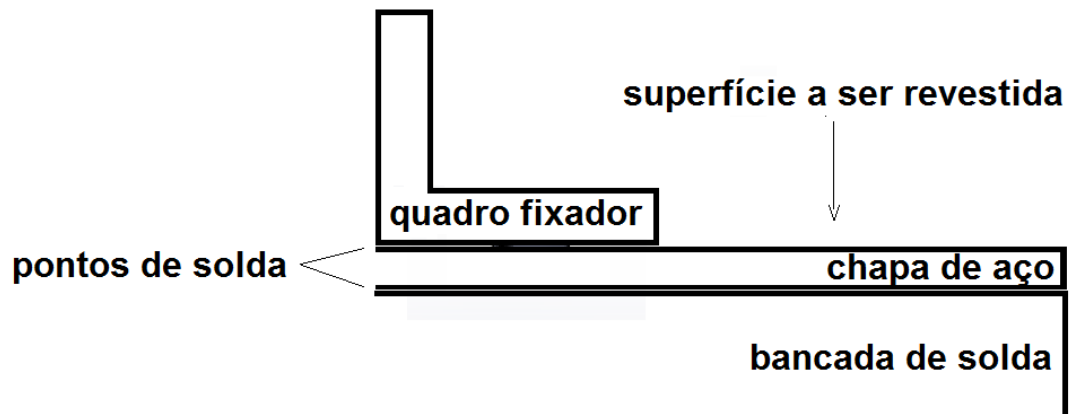
Figura 27 – Dispositivo 1 reforçado por grampos



Fonte: Próprio autor

➤ Dispositivo 2 – Na tentativa de minimizar ainda mais os efeitos da distorção, a segunda chapa foi soldada à mesa e o quadro fixador foi soldado à chapa. Contudo, no decorrer do processo de revestimento, o dispositivo foi reforçado também com grampos tipo C. A Figura 30 ilustra parte da vista lateral do novo dispositivo de fixação da chapa, e a Figura 31 apresenta o dispositivo 2 pronto para ser revestido.

Figura 28 – Croqui da vista lateral do Dispositivo 2



Fonte: Próprio autor

Figura 29 – Dispositivo 2



Fonte: Próprio autor

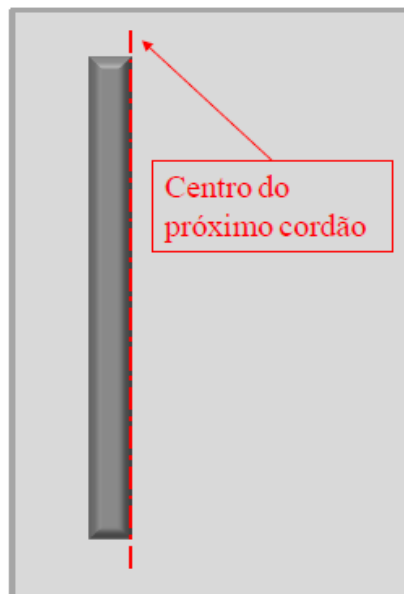
Os seguintes procedimentos foram adotados para que o revestimento das chapas, com 6,35 mm de espessura, fosse feito de forma padronizada:

- Antes de cada cordão de solda, foi verificada a quantidade de gás de proteção, o estado do bico de solda, os parâmetros de soldagem e o estado de distorção da chapa;
- Após a execução de cada cordão de solda, a temperatura da chapa foi

monitorada por um termômetro infravermelho, de modo que o próximo cordão de solda fosse feito após a chapa atingir a temperatura de 45°. Com isso, buscava-se manter as mesmas condições de soldagem para cada cordão;

- Nos casos onde houve irregularidade na soldagem, ocasionada por falhas de material ou equipamento, a deposição foi interrompida imediatamente, e uma verificação na configuração dos equipamentos e dos parâmetros foi realizada;
- Foram feitos 97 cordões de solda em cada chapa revestida, sendo que cada cordão foi feito em, aproximadamente, 3 minutos, com intervalo médio de 30 minutos entre cordões; e
- Cada cordão foi depositado de forma subsequente ao primeiro, de modo que o centro de cada cordão ficasse no final da largura do cordão anterior, conforme mostrado na Figura 29.

Figura 30- Croqui da vista superior indicando a posição do centro do próximo cordão a ser depositado



Fonte: ZILIO, et al., (2014)

4.5 ALÍVIO DE TENSOES REALIZADO EM UMA DAS CHAPAS REVESTIDAS

Após o corte das chapas revestidas, uma delas foi submetida ao processo de revenimento, no forno LINN ELEKTRO THERM, durante 2 horas, à temperatura de 180 °C. A Figura 33 apresenta o forno utilizado.

Figura 31 - Forno LINN ELEKTRO THERM



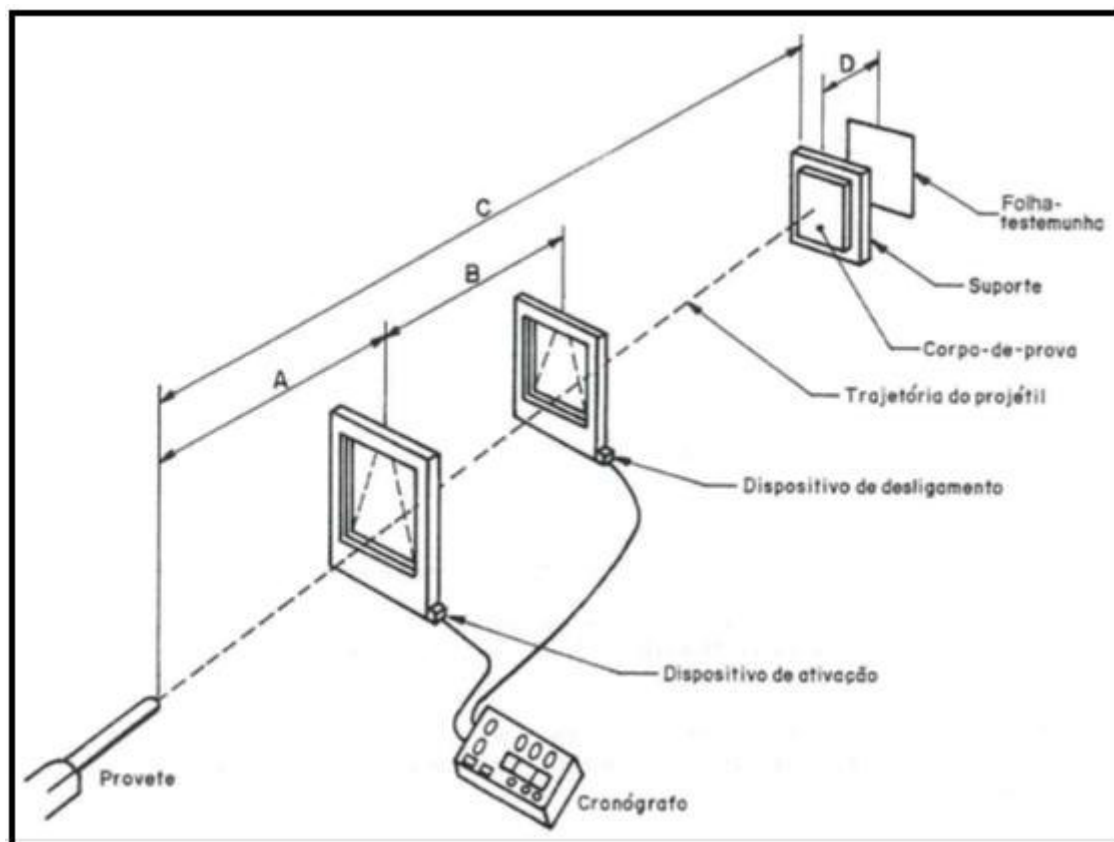
Fonte: Próprio autor

Após a retirada da chapa do forno, as chapas com tamanho inicial de 750 mm X 750 mm, foram reduzidas para 500 mm X 500 mm, em acordo com a norma.

4.6 TESTE BALÍSTICO

O ensaio balístico foi realizado no Centro de Avaliações do Exército (CAEx), organização militar responsável por homologar todos os materiais blindados utilizados em território nacional, localizado na Marambaia, Rio de Janeiro. A linha de tiro utilizada para o teste estava equipada com os itens previstos na NBR 15000, com exceção da folha testemunha. A Figura 34 ilustra a posição de cada item na linha de tiro.

Figura 32 - Arranjo para ensaio balístico



Fonte: NBR 15000

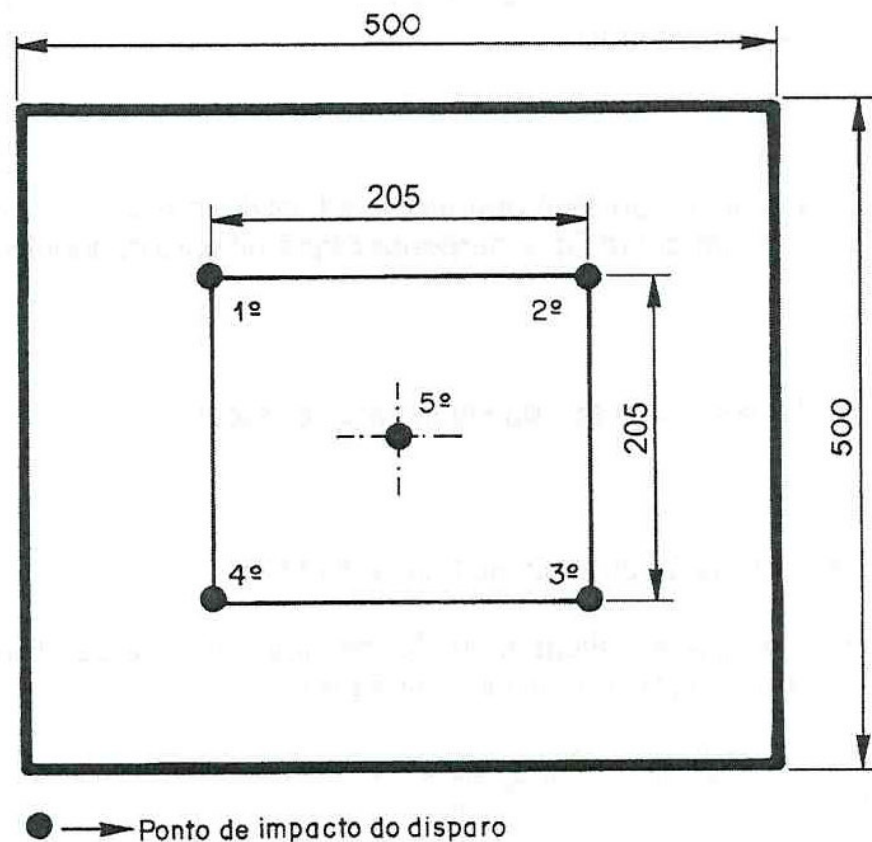
Com base na Figura 34, as seguintes características foram adotadas para a avaliação da blindagem nível III:

- Provete: Equipamento utilizado para disparar tiros de calibre desejado. No caso, foi utilizado um provete com calibre de 7.62 mm, distante 15 metros do alvo ($C=15$) e 2 metros do dispositivo de ativação ($A=2$);
- Cronógrafo: Equipamento que utiliza dois sensores, em forma de quadro, para calcular a velocidade do projétil. A distância entre os dispositivos é de 1 metro ($B=1$); e
- Suporte: Mecanismo para fixação do corpo de prova.

Apesar de não ter sido utilizada no teste, a Folha Testemunha é uma chapa de alumínio empregada para avaliação da perfuração no corpo de prova, seguindo o critério de proteção.

Em acordo com a norma, foram disparados 5 tiros em cada corpo de prova, conforme posições e sequências indicadas na Figura 35.

Figura 33 – Posicionamento e sequência dos disparos



Fonte: NBR 15000

A ordem dos testes, ocorreu da seguinte forma; primeiramente a chapa de aço SAE 1020 foi testada; depois a chapa revestida/revenida; e por último, a chapa revestida.

4.7 ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA

Nesta etapa foram realizadas análises microscópicas com o objetivo de identificar o comportamento dos corpos de prova submetidos ao ensaio balístico, comparar as características de soldagem com a análise feita após os testes iniciais, e identificar os efeitos do tratamento térmico aplicado. Foram utilizadas 5 amostras de cada corpo de prova, totalizando 15 amostras que foram analisadas no microscópio óptico (MO) e no microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo

JEOL JSM 6610 LV, incluindo a análise com EDS. O referido equipamento pode ser observado na Figura 36.

Figura 34 – MEV modelo JEOL JSM 6610 LV



Fonte: Site do fabricante

Todas as amostras foram preparadas para a análise metalográfica, conforme os seguintes procedimentos:

1. As peças foram cortadas, gerando amostras que, em média, apresentavam 45 mm de comprimento, 12,7 mm de largura e 12 mm de espessura;
2. Foram utilizadas, sucessivamente, as lixas 100, 200, 400, 600, 1000 e 1200, para o lixamento das amostras, seguido de polimento com Alumina (abrasivo);
3. Limpeza e secagem das amostras; e
4. O ataque químico na camada com aço inoxidável foi feito com Vilela (100ml de álcool + 1g de ácido píclico + 5ml de ácido clorídrico) e na camada com aço carbono foi utilizado o nital 2% (98ml de álcool + 2 ml de ácido nítrico). A Figura 37 apresenta algumas amostras atacadas.

Figura 35 – Amostras prontas para análise



Fonte: Próprio autor

5 RESULTADOS E DISCUSÕES

A apresentação dos resultados está dividida em três etapas, sendo elas:

- Preparação dos corpos de prova e análises iniciais;
- Aplicação de Revestimento e Revenimento; e
- Teste balístico e análise dos corpos de prova.

5.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA E ANÁLISES INICIAIS

As chapas utilizadas neste trabalho foram comercializadas como aço SAE 1020, porém, após análise em espectrômetro, cujo resultado está apresentado na Tabela 6, observa-se que ambas as chapas apresentam 0,16% de carbono.

Tabela 6 – Composição química das chapas de aço

	Elementos Químicos					
	Fe	C	Mn	Si	P	S
chapa com 6,35 mm de espessura	98,3	0,162	0,663	0,2960	0,0178	0,0177
chapa com 12,70 mm de espessura	98,7	0,162	0,410	0,0769	0,0075	0,0087

Fonte: Próprio autor

Embora haja diferença entre o percentual de carbono pretendido para a realização deste trabalho e o percentual existente na chapa, foi mantida a utilização deste material, tendo em vista a disponibilidade no comércio e o menor preço de oferta.

A composição química do arame eletrodo maciço ER 410, com 1 mm de diâmetro, utilizado para revestir as chapas com 6,35 mm de espessura, pode ser observada na Tabela 7, conforme dados disponibilizados pelo fabricante.

Tabela 7 – Composição química do arame eletrodo ER 410

Elementos Químicos			
	C	Cr	Mn
ER 410	< 0,12	≅ 12,5	≅ 0,6

Fonte: Adaptado do Site do fabricante

Uma vez fixados o substrato e o material a ser depositado, o tipo de gás de proteção foi o principal parâmetro a ser definido. Embora a literatura não indique a utilização de misturas com mais de 4% de carbono para aplicação em aços inoxidáveis, a mistura Ar-CO₂(25%) foi adotada por oferecer considerável molhabilidade ao cordão de solda.

A partir dessas variáveis (substrato + eletrodo + gás de proteção), foram realizados testes de solda na bancada seguidos por análises de adesão do revestimento, feitas através de macroataque e visualização por lupa, sendo alcançados os parâmetros apresentados na Tabela 8, utilizados na realização deste trabalho.

Tabela 8 – Parâmetros de soldagem adotados

PARÂMETROS	VALORES
Tensão (V)	29,5
Corrente (A)	168
Velocidade de alimentação (m/min)	6
Velocidade de soldagem (cm/min)	18,2
DBCP (mm)	7
Ângulo de ataque da tocha	90°
Tipo de gás	Ar-CO ₂ (25%)
Vazão do gás (l/min)	25
Diâmetro do fio eletrodo (mm)	1

Fonte: Próprio autor

As amostras do revestimento, utilizando os parâmetros já definidos, apresentaram pontos onde houveram falta de fusão do substrato, porém foi considerada uma adesão satisfatória para o objetivo deste trabalho. A altura do cordão de solda desejada, de 6.35 mm, não foi obtida, sendo observado que variações na velocidade de soldagem e na velocidade de alimentação, para obter tal

dimensão, estavam causando problemas no processo de soldagem, devido ao superaquecimento do bico de contato.

Observa-se, através da Figura 38, a amostra tirada dos testes iniciais, utilizando os parâmetros adotados para a realização deste trabalho. O revestimento (R) apresentou 5,05 mm de espessura, e considerando que o substrato (MB) tem 6,35 mm, a amostra apresentou 11,4 mm de espessura final.

Figura 36 – Revestimento feito em fase de teste

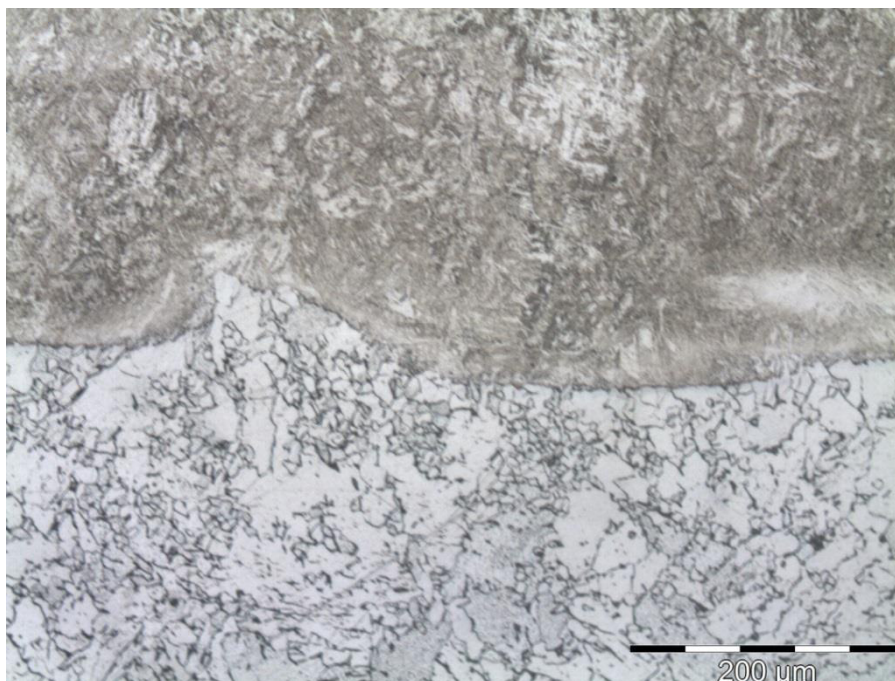


Fonte: Próprio autor

Considerando que as chapas revestidas terão a mesma espessura desta amostra, haverá uma diferença de 1,3 mm entre a espessura das chapas revestidas e a chapa de aço SAE 1020. Essa diferença será considerada por ocasião da comparação de desempenho entre as chapas.

A avaliação da soldagem foi realizada em microscópio ótico (MO), de modo a verificar se a microestrutura da amostra apresenta características aceitáveis para a continuação deste experimento. Observa-se, através da Figura 39, que a microestrutura é composta basicamente por martensita no revestimento, e por ferrita + perlita no metal base.

Figura 37 – Microestrutura na interface solda/substrato



Fonte: Próprio autor

Além da avaliação microestrutural, a dureza do material foi analisada através do ensaio de microdureza em cada camada. Os resultados do ensaio mostram que a dureza da camada depositada é superior a três vezes o valor da dureza do substrato, conforme apresentado na Tabela 9. As identações foram feitas a partir da interface da solda com o substrato até a extremidade de cada camada.

Tabela 9 – Valores de microdureza Vickers

	Valor de dureza (HV) registrada em cada identificação		
	1	2	3
Metal base	140	138	133
Metal de adição	432	445	439

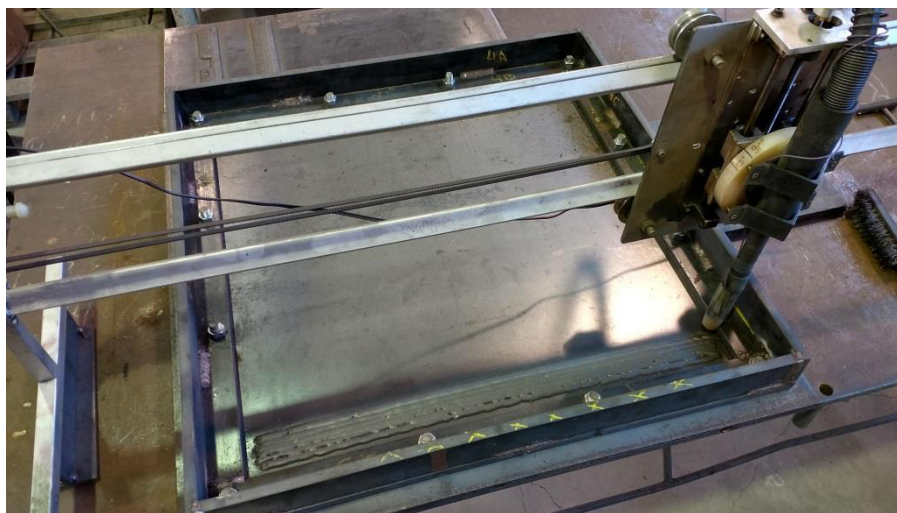
Fonte: Próprio autor

5.2 APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO E REVENIMENTO

No início do processo de revestimento, os primeiros cordões de solda foram depositados sem o devido alinhamento, por serem feitos como teste para a

produção dos demais. Já prevendo o descarte dessa região, das regiões distorcidas, e das regiões de início/fim dos cordões, as chapas foram dimensionadas com tamanhos maiores que os previstos em norma. A Figura 37 mostra os primeiros cordões de solda na primeira chapa.

Figura 38 – Início do processo de revestimento



Fonte: Próprio autor

Durante a realização do revestimento, havia constante preocupação sobre a magnitude das distorções ao final do processo. No decorrer do primeiro terço da chapa, as deposições não geravam distorções consideráveis, porém, a partir daí, ocorreram contrações transversais do material e flambagem nas margens, gerando a quebra de grande parte das barras roscadas na primeira chapa, e quebra da maioria dos pontos de solda feitos na segunda chapa. A Figura 38 mostra as duas chapas após o término do processo de revestimento. Observa-se que a segunda chapa a ser revestida (à esquerda) apresenta menores distorções quando comparada a primeira chapa revestida (à direita). Essas chapas sofrerão um corte para adequar as dimensões de 750 mm X 750 mm para 500 mm X 500 mm, em cumprimento às exigências da norma NBR 1500.

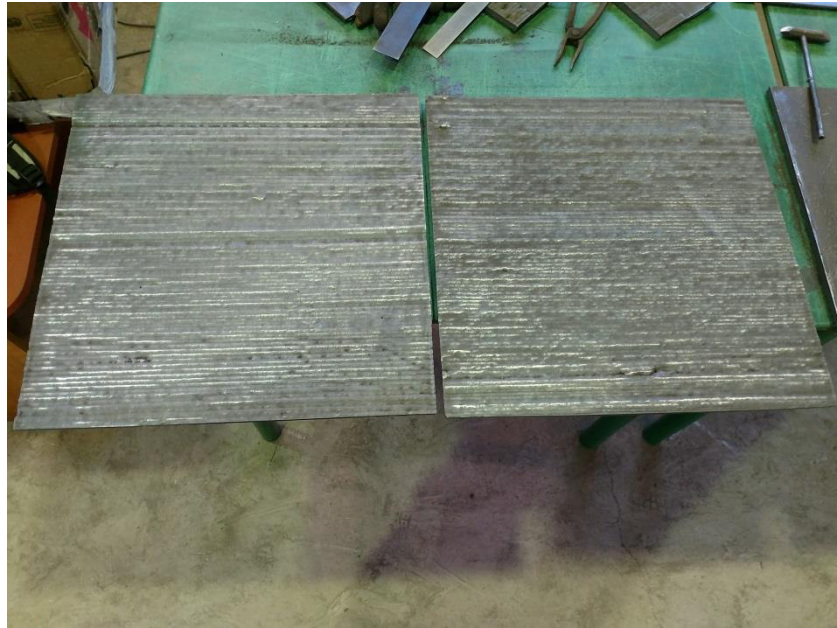
Figura 39 – Chapas revestidas não acabadas



Fonte: Próprio autor

Devido ao fato desses efeitos da distorção terem se concentrado nas margens nas chapas, a região revestida foi afetada apenas em suas extremidades. No corte das chapas, a área excedente, que incluía as deformidades, foi retirada, e o produto final apresentou-se sem distorções, conforme a Figura 39.

Figura 40 – Chapas revestidas prontas para teste balístico



Fonte: Próprio autor

Cabe destacar que alguns defeitos ocorreram durante o processo, tais como:

- Problemas na alimentação do arame eletrodo, na maioria das vezes, por avaria do bico de contato;
- Problemas no fluxo de gás, devido a uma avaria na válvula de gás acoplada ao cilindro;
- Problemas na correia do mecanismo de soldagem, que se soltava na região emendada; e
- Desalinhamento de alguns cordões de solda, devido à necessidade de correções de problemas causados pelos itens acima, pois eram resolvidos por cordões de solda que se iniciavam do ponto onde ocorreu o problema da solda anterior.

Através das Figuras 42(a) e 42(b), observam-se exemplos desses problemas.

Figura 41 – Problemas na execução do revestimento



Fonte: Próprio autor

Após o revestimento e corte das chapas, foi aplicado o revenimento a 180°C, durante 2 horas, em uma das chapas revestidas, visando a melhora da tenacidade e com pequenas alterações na dureza do material. Após o término, as 3 chapas estavam prontas para serem testadas na linha de tiro. As características funcionais das chapas são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 Características funcionais dos corpos de prova

Corpo de Prova	Principais Características		
	chapa revestida e revenida	chapa revestida	chapa sem revestimento
Peso (kg)	25	25	28
Espessura do substrato (mm)	6,35	6,35	X
Espessura média do Revestimento (mm)	5,05	5,05	X
Espessura da Chapa (mm)	11,4	11,4	12,7

Fonte: Próprio autor

5.3 TESTE BALÍSTICO E ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA

Após a realização dos testes balísticos os pontos de impacto são observados, conforme apresentado na Figura 43, onde o efeito de cada tiro na chapa foi marcado com cores diferentes para melhor entendimento. A cor azul

identifica os tiros que não perfuraram as chapas; a cor laranja identifica os tiros que perfuraram as chapas; e a cor vermelha identifica os tiros inválidos. Sendo assim, ao final do teste balístico, observa-se que:

- A chapa de aço carbono não revestida, não foi perfurada, ou seja, resistiu aos 5 tiros;
 - A chapa revestida e revenida, obteve 2 perfurações, resistindo a 3 tiros;
- e
- A chapa revestida foi totalmente perfurada, ou seja, não resistiu aos 5 tiros .

Os tiros considerados inválidos não estavam previstos no teste e foram disparados no intuito de definir a velocidade limite do projétil, onde há resistência eficiente da chapa. Contudo os projetis utilizados nesta tentativa apresentavam velocidades acima das previstas em norma e por isso foram desconsiderados.

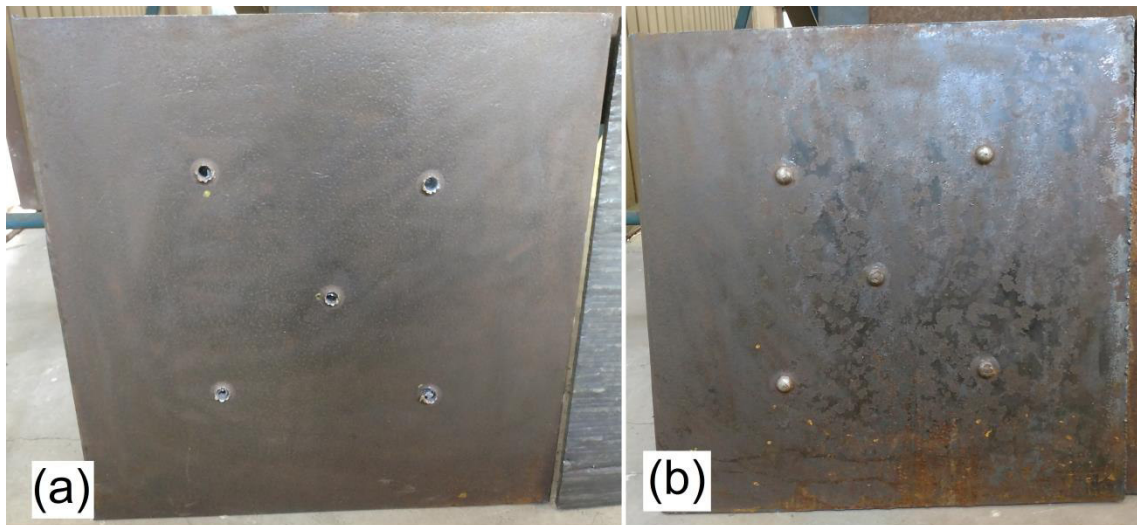
Figura 42 – Situação das chapas após o teste balístico



Fonte: Próprio autor

A chapa sem revestimento pode ser melhor observada, após o teste balístico, através da Figura 42(a), que mostra a frente da chapa , e através da Figura 42(b), onde observa-se o verso da chapa. De acordo com as definições de Backman (1978), nota-se a presença de pétalas frontais, em cada ponto de impacto, na face de ataque. No verso da chapa, notam-se significativas deformações nos pontos de impacto.

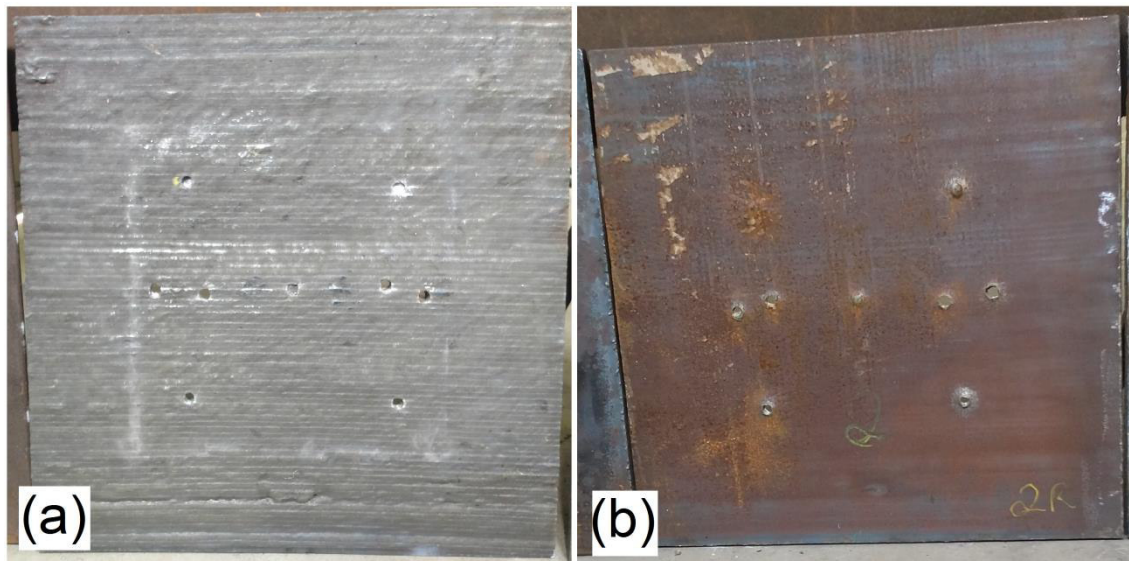
Figura 43 - Frente/Verso da chapa sem revestimento após o teste balístico



Fonte: Próprio autor

Da mesma forma, a chapa revestida/revenida pode ser melhor observada, após o teste balístico, através da Figura 43(a), que mostra a frente da chapa, e através da Figura 43(b), onde observa-se o verso da chapa. Na face de ataque, as regiões dos pontos de impacto, sejam eles com penetração ou perfuração, não apresentaram fragmentação do material. No verso da chapa, os pontos perfurados apresentam pétalas dorsais, e os pontos não perfurados apresentam pequenas deformações.

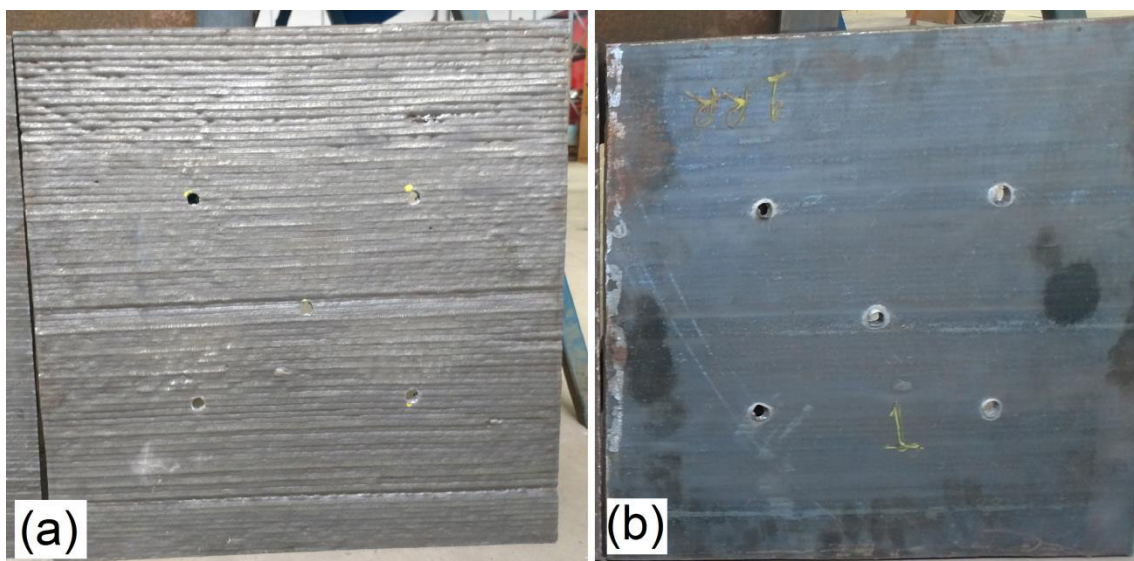
Figura 44 - Frente/Verso da chapa revestida/revenida após o teste balístico



Fonte: Próprio autor

Por último, a chapa revestida pode ser melhor observada, após o teste balístico, através da Figura 44(a), que mostra a frente da chapa, e através da Figura 44(b), onde observa-se o verso da chapa. Nota-se a presença de pétalas frontais e pétalas dorsais, localizadas respectivamente nos pontos de impacto a frente e no verso da chapa.

Figura 45 - Frente/Verso da chapa revestida após o teste balístico

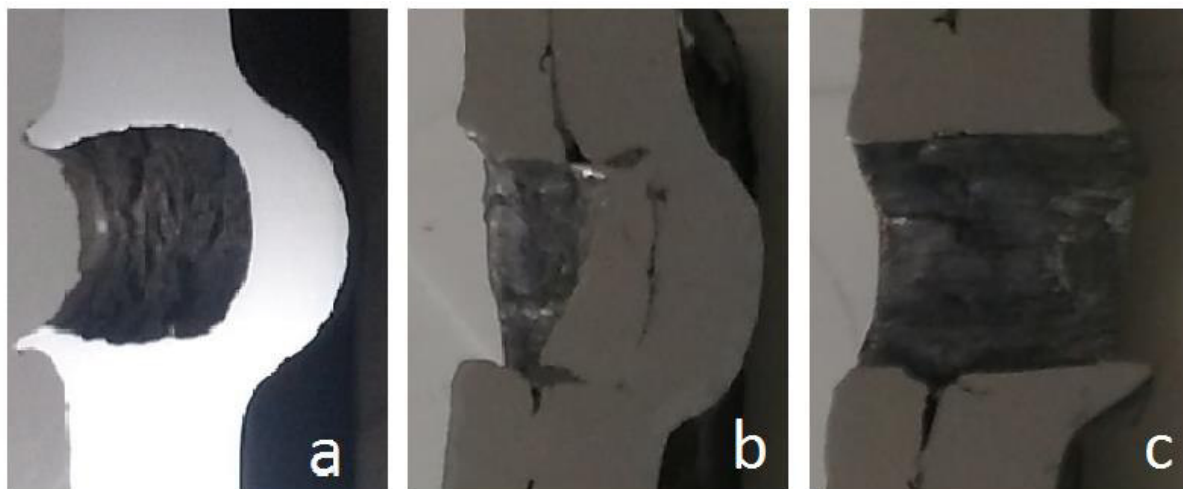


Fonte: Próprio autor

Observando o perfil lateral de amostras, nos pontos de impacto de cada chapa, através das Figuras 44(a), 44(b) e 44(c) que correspondem respectivamente, a chapa sem revestimento, a chapa revestida/revenida e a chapa revestida, nota-se que:

- A chapa sem revestimento, representada pela Figura 44(a), apresentou considerável deformação nos pontos de impacto;
- A chapa revestida e revenida, representada pela Figura 44(b), apresentou fraturas, por cisalhamento, das suas camadas depositadas e pequenas deformações, nos pontos de impacto que resistiram aos tiros. Os pontos perfurados apresentaram comportamentos similares aos pontos de impacto da chapa revestida;
- e
- A chapa revestida, representada pela Figura 44(c), apresentou fratura por batoque em todos os pontos de impacto.

Figura 46 – Pontos de impacto em cada chapa



Fonte: Próprio autor

Baseado nos desempenhos balísticos, e considerando o intervalo para a velocidade do projétil estabelecido pela norma, que é de 838 ± 15 m/s, o resumo do teste balístico pode ser observado através da tabela 11.

Tabela 11 – Resultados do teste balístico

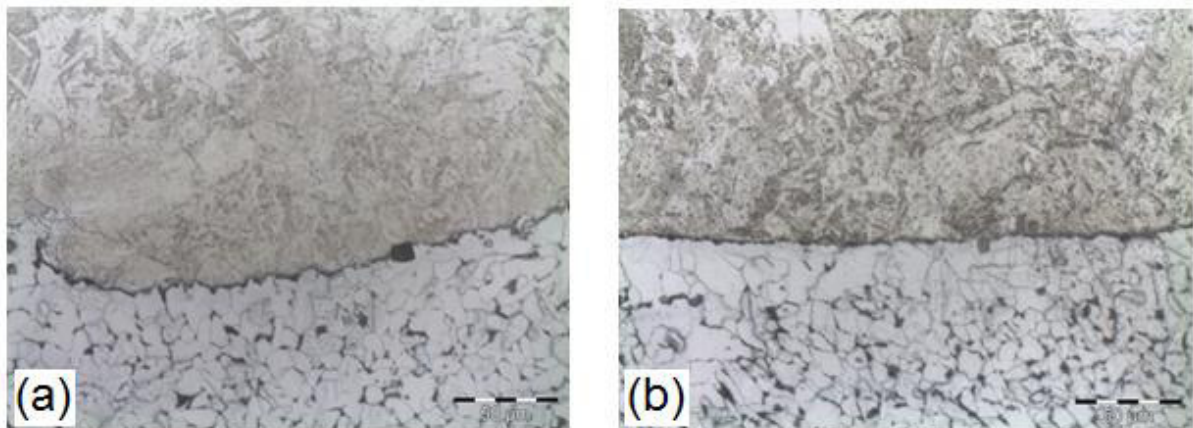
TESTE BALÍSTICO						
CORPO DE PROVA	VELOCIDADE DO PROJÉTIL EM CADA PONTO (m/s)					OCORRÊNCIA DE PERFURAÇÃO
	1	2	3	4	5	
chapa revestida e revenida	842	836	849	851	855	Em 2 pontos
chapa revestida	850	848	831	828	840	Em todos os pontos
chapa de aço SAE 1020	832	851	829	852	844	Em nenhum ponto

Fonte: Próprio autor

Após os testes balísticos, foram realizadas análises dos corpos de prova através de suas amostras. Primeiramente, através do MO, a interface solda/substrato foi observada na chapa revestida, como mostra a Figura 45(a), e na chapa revestida/revenida, como mostra a Figura. Da mesma forma que ocorreu com a chapa utilizada nos testes iniciais, as imagens das 2 chapas revestidas mostram que, na ZTA, devido ao elevado aporte térmico nessa região, ocorreu crescimento dos grãos de ferrita. Consequentemente, ocorre a fragilização dessas regiões, devido à facilidade do movimento de discordâncias no material. As regiões claras (ou brancas) estão relacionadas à presença de ferrita, e os pontos (ou regiões) mais escuros referem-se à presença de perlita

Na ZF há considerável presença de ferrita delta e, consequentemente, esta região apresenta significativa fragilização. A precipitação de carbonetos nos contornos de grão da ferrita delta, explica a degradação das propriedades nessa região, pois parte do Cr e C, não estão distribuídos, permanecendo ausentes em várias partes desta região. As regiões claras (ou brancas) estão relacionadas à presença de ferrita delta no meio da estrutura martensítica (região mais escura).

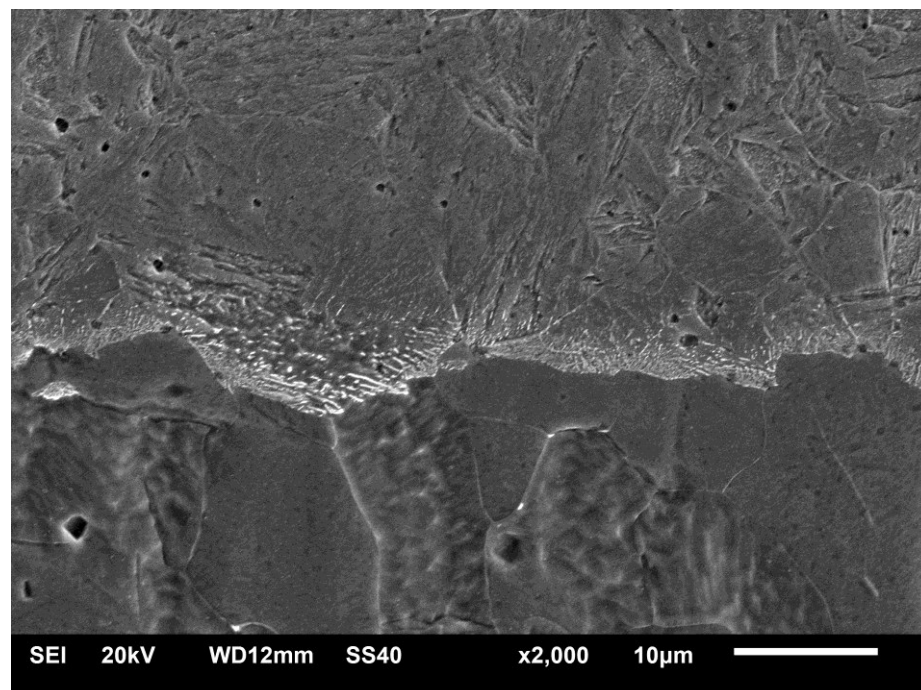
Figura 47 – Microestrutura na interface solda/substrato das chapas revestidas



Fonte: Próprio autor

A Figura 49, mostra com mais detalhes, a microestrutura da ZF, próxima à interface solda/substrato, através do MEV. Apesar de ser uma imagem observada na chapa revestida/revenida, ela representa a ZF, próxima à interface solda/substrato, de ambas as chapas revestidas, por não apresentarem diferenças significativas observadas nessa região.

Figura 48 – Microestrutura da interface solda/substrato



Fonte: Próprio autor

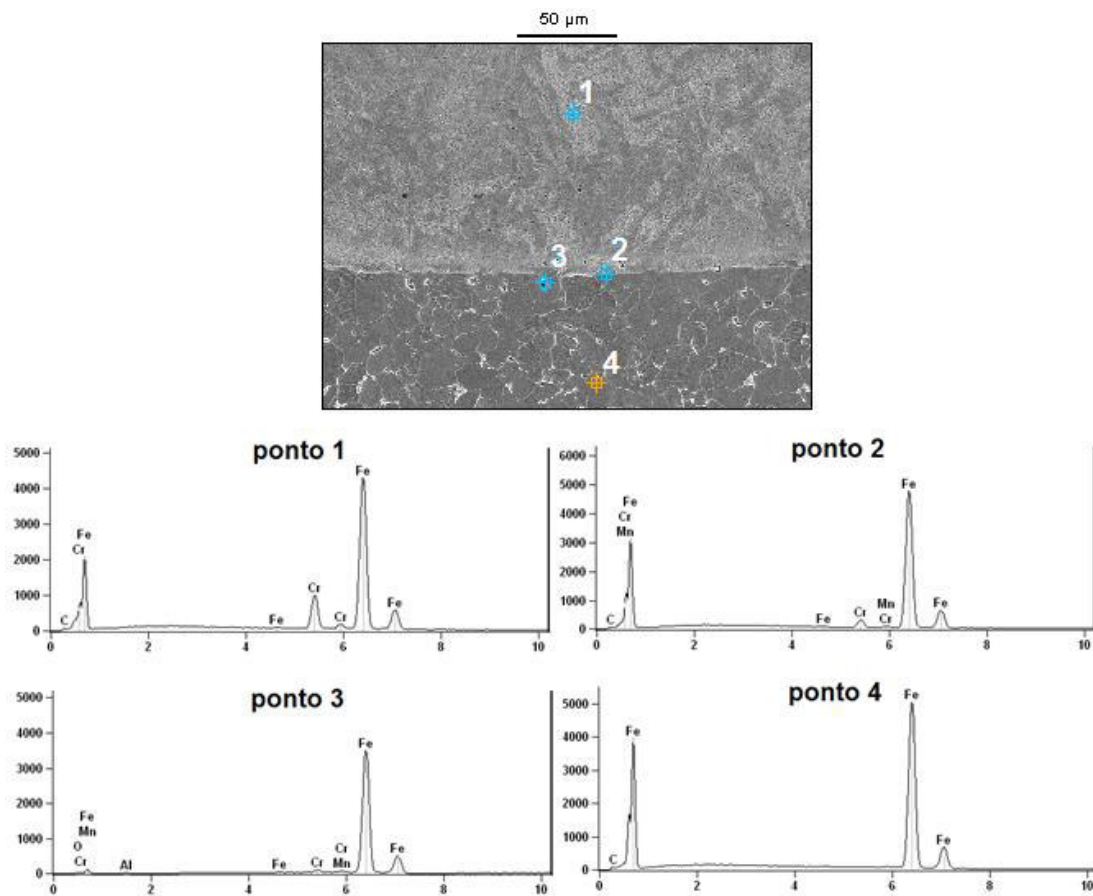
Foi feita também uma avaliação qualitativa, na interface da solda, da chapa revestida/revenida, através de EDS, conforme apresentado pela Figura 48. Tendo em vista que não há diferenças significativas na microestrutura das chapas revestidas, a imagem tirada da chapa R representa a análise de elementos nas duas chapas revestidas.

Nota-se, através da Figura 50, que 4 pontos foram analisados:

- 1 – referente à ZF;
- 2 – ponto localizado na ZF, próximo à interface solda/substrato;
- 3 - ponto localizado na ZTA, próximo à interface solda/substrato; e
- 4 – referente à ZTA.

Tal análise representa as duas chapas revestidas, visto que ambas possuem características similares nesta região.

Figura 49 – Microestrutura da ZTA observada em MEV e análise química realizada por EDS

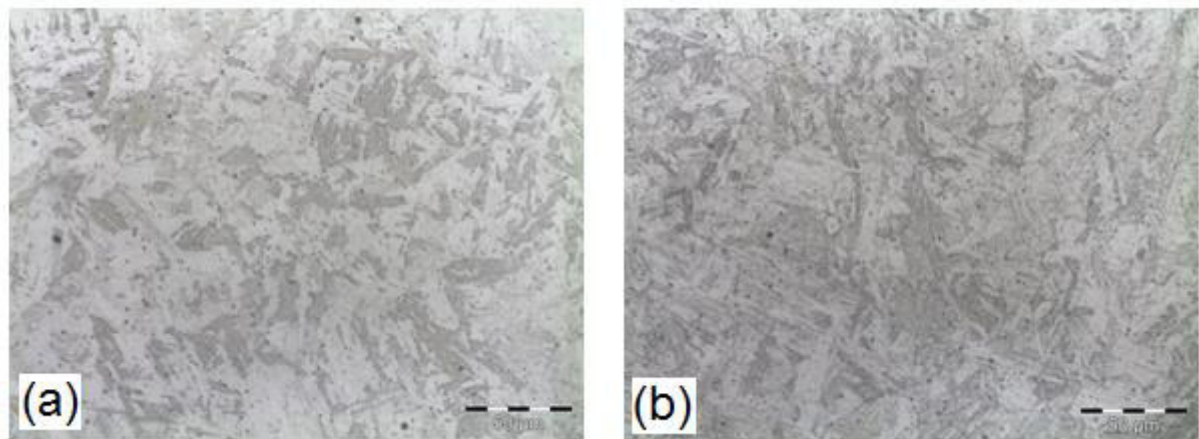


Fonte: Próprio autor

De um modo geral, a região da ZF apresenta, predominantemente, em sua microestrutura, os elementos ferro e cromo. Já na ZTA, observa-se a presença de ferro, com nenhuma presença significativa de cromo, devido à falta de diluição da solda.

Observando as regiões da ZF na chapa revestida, conforme Figura 48(a), e na chapa revestida/revenida, conforme Figura 48(b), nota-se que, além da presença de ferrita delta já destacada, há uma pequena diferença relativa à uniformidade dos constituintes microestruturais. A chapa revestida/revenida apresenta estrutura martensítica melhor distribuída na ZF.

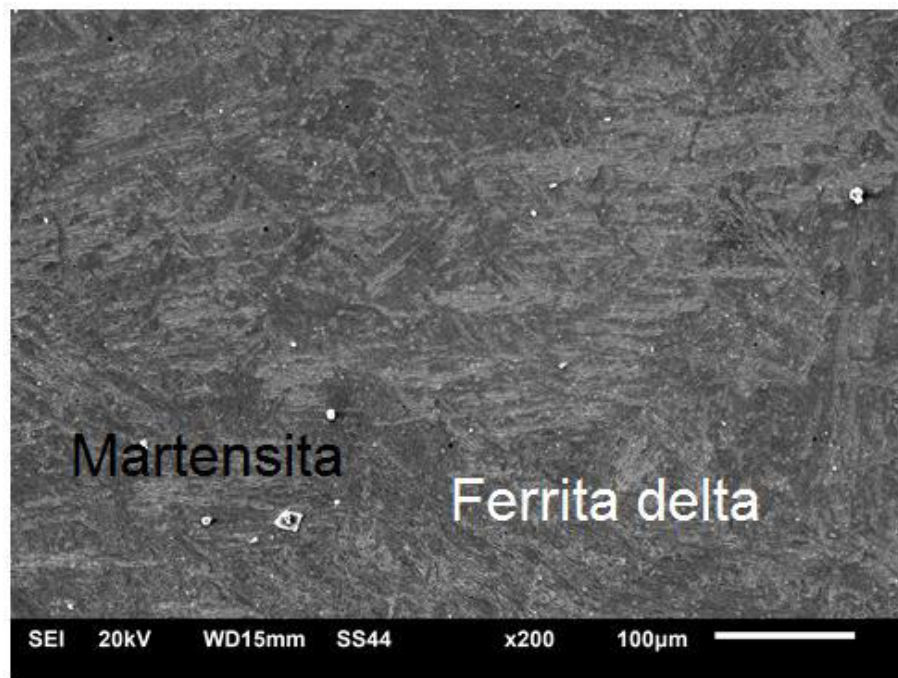
Figura 50 – Microestrutura do revestimento em cada chapa observadas em MO



Fonte: Próprio autor

A Figura 47, mostra com mais detalhes, a microestrutura da ZF, através do MEV. Apesar de ser uma imagem observada na chapa revestida/revenida, ela representa a ZF, próxima à interface solda/substrato, de ambas as chapas revestidas, por não apresentarem diferenças significativas.

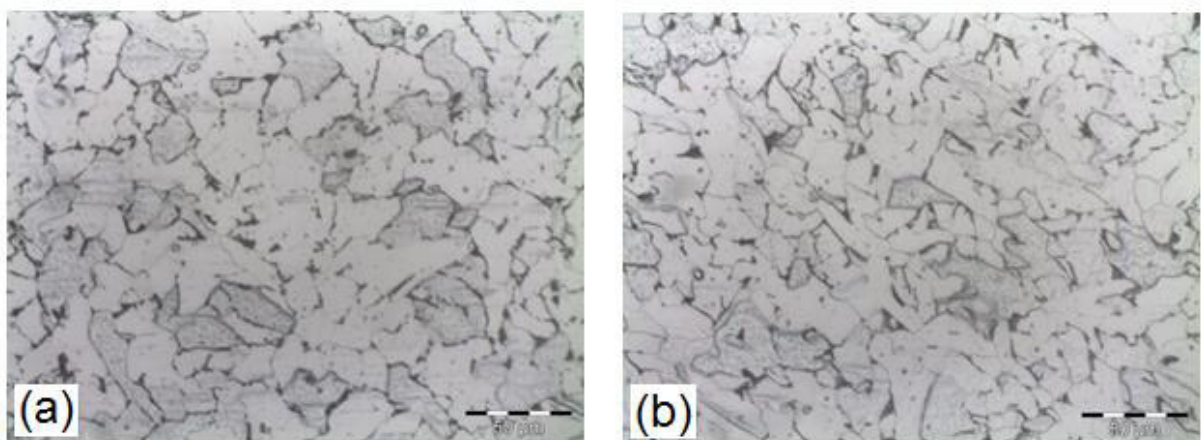
Figura 51 – ZF próxima à interface solda/substrato da chapa revestida/revenida



Fonte: Próprio autor

Ao se observar as microestruturas dos substratos da chapa revestida, através de MO, como mostrado na Figura 46(a), e da chapa revestida/revenida, como mostrado na Figura 46(b), notam-se que os arranjos são similares entre si, sem alterações microestruturais consideráveis.

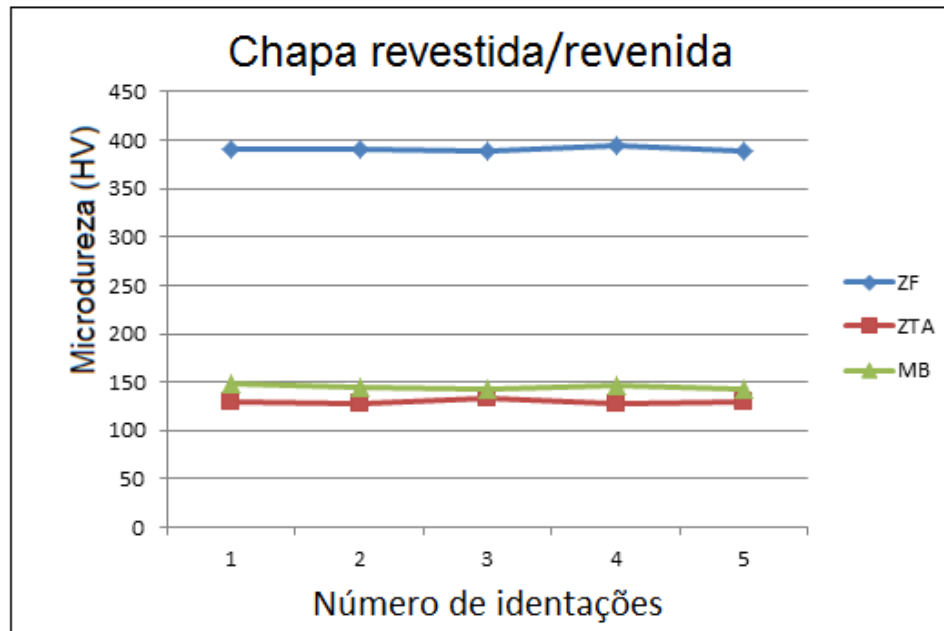
Figura 52 – Microestrutura do substrato das chapas revstidas



Fonte: Próprio autor

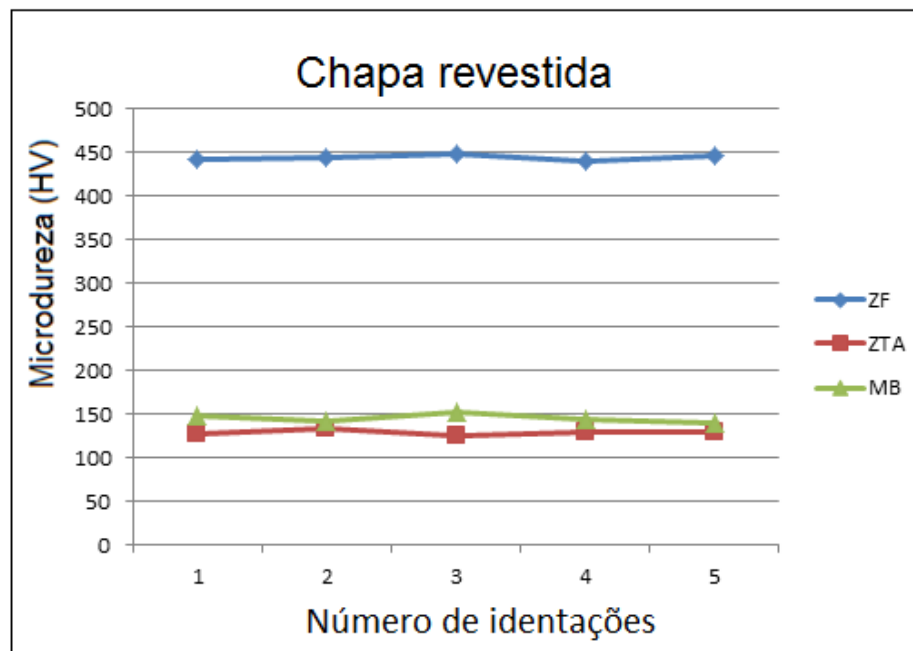
Após as análises de microscopia, foi realizado teste de microdureza em cada chapa revestida. Com base nos perfis de microdureza da ZF, ZTA e MB, observa-se que a chapa revestida/revenida, na Figura 55 apresenta um valor menor de microdureza na ZF, quando comparada à chapa revestida, na Figura 56. Ambas as chapas apresentam valores similares de microdureza no MB. Por fim, ambas as chapas apresentam valores menores de microdureza na ZF, quando comparados com o MB. Cabe destacar que essa diferença de valores na microdureza da ZF em cada chapa, deve-se ao revenimento feito em uma das chapas.

Figura 53 – Perfil de microdureza da chapa revestida/revenida



Fonte: Próprio autor

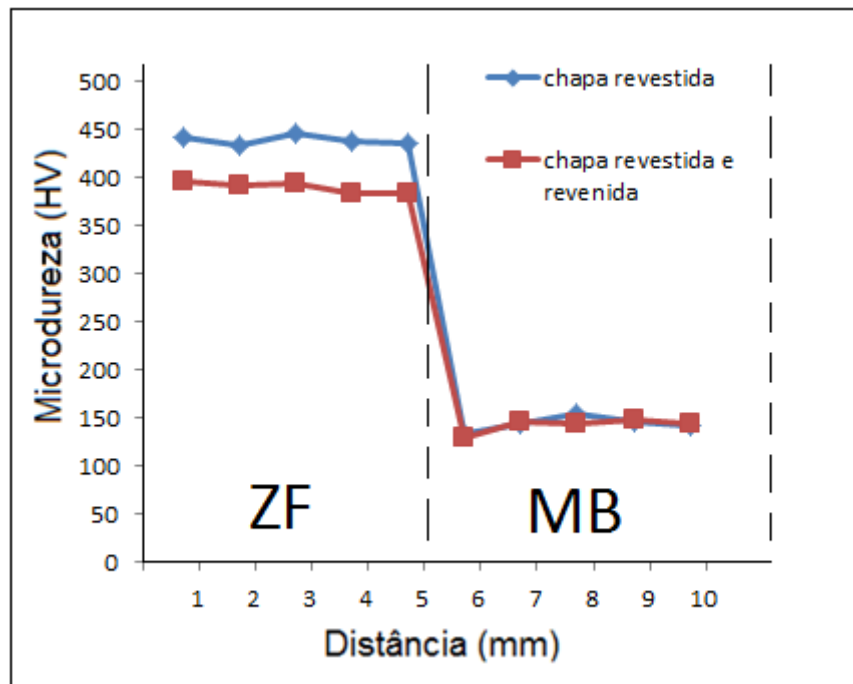
Figura 54 – Perfil de microdureza da chapa revestida



Fonte: Próprio autor

Com base nos perfis de microdureza de cada chapa revestida, foi feito um perfil de microdureza de ambas as chapas ao longo de cada região, que pode ser observado na Figura 56.

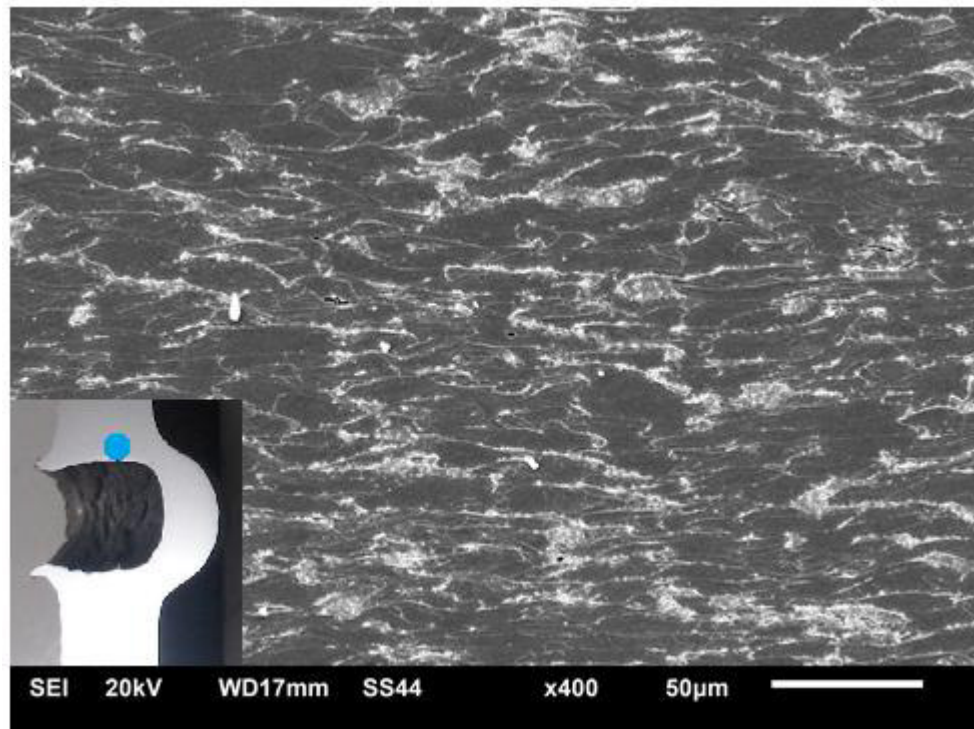
Figura 55 – Perfil de microdureza das chapas revestidas



Fonte: Próprio autor

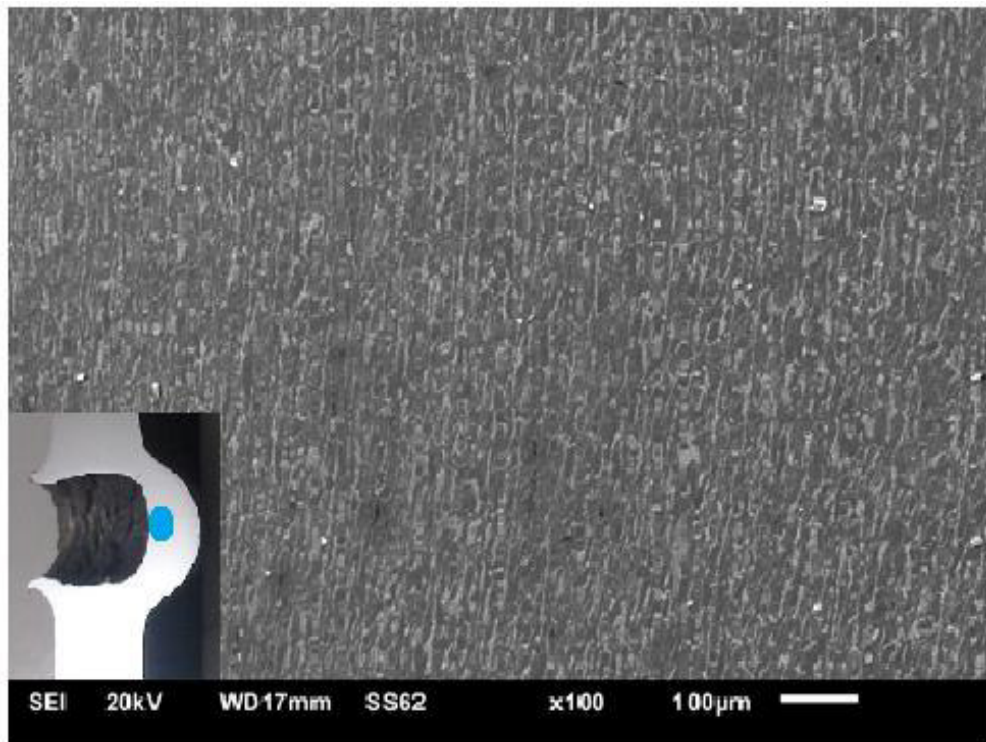
Ao analisar a microestrutura da chapa sem revestimento, que é similar à microestrutura do MB nas chapas revestidas, procurou-se destacar os pontos onde houveram alterações causadas pelo impacto balístico. Observa-se, através da Figura 57 e da Figura 58, como a microestrutura de um ponto próximo ao impacto, fica deformada. Os pontos analisados estão destacados nas imagens com a cor azul.

Figura 56 – Microestrutura da região lateral ao tiro na chapa sem revestimento



Fonte: Próprio autor

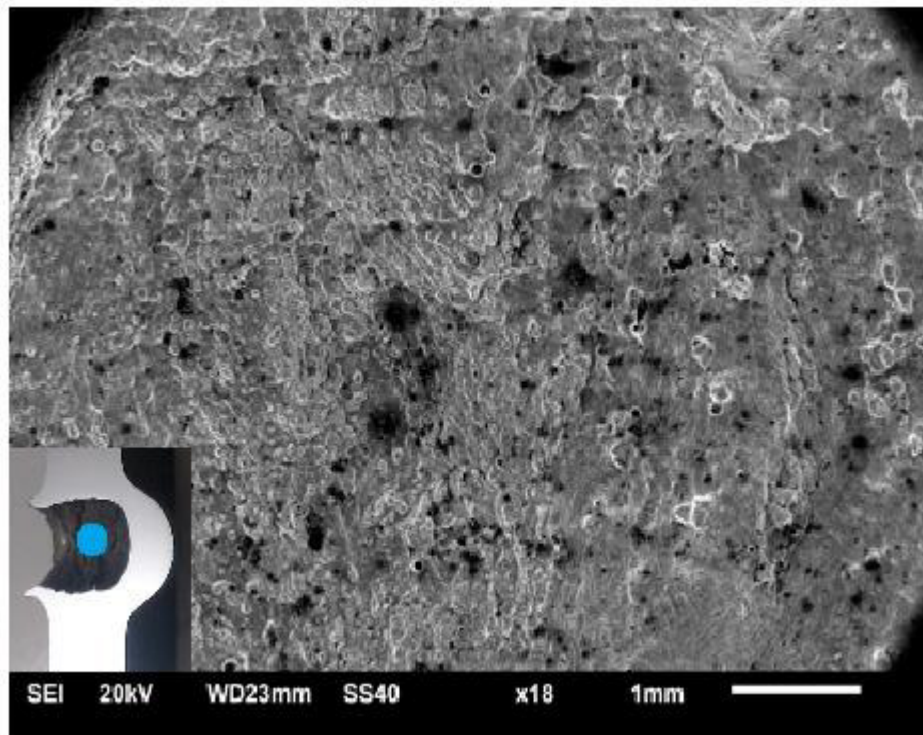
Figura 57 – Microestrutura da região frontal ao tiro na chapa sem revestimento



Fonte: Próprio autor

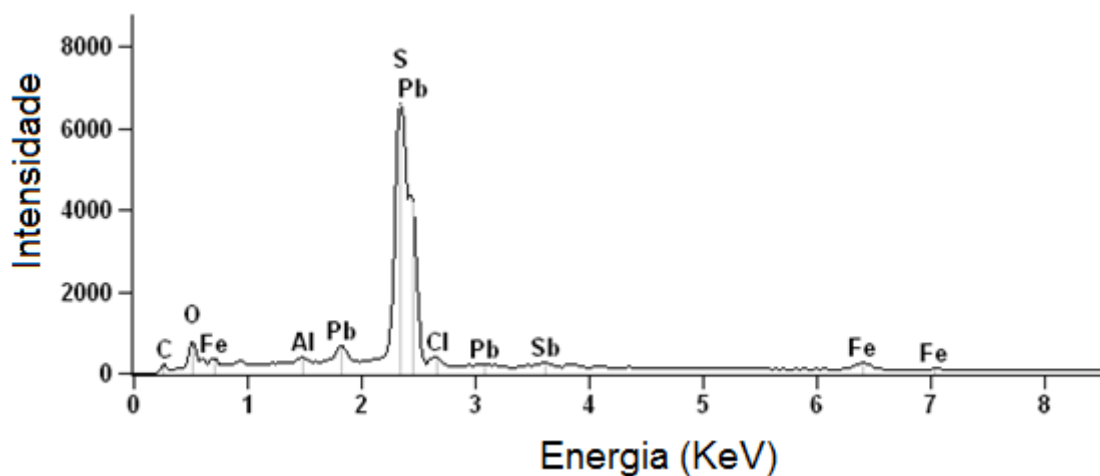
A região de impacto foi observada em MEV, conforme Figura 59, e analisada em EDS, conforme Figura 60, representando os pontos de impacto das três chapas, pois apresentam microestruturas similares nesta região. Nota-se a presença significativa de chumbo e enxofre, por se tratarem de elementos que compõem a munição utilizada nos testes. O ponto analisado está destacado na imagem com a cor azul.

Figura 58 – Microestrutura da região do tiro na chapa sem revestimento



Fonte: Próprio autor

Figura 59- Análise química da região do tiro



Fonte: Próprio autor

A avaliação da microdureza na chapa sem revestimento, foi feita em pontos na região tangente ao impacto balístico e em pontos que não sofreram alterações causadas pelos impactos. Observa-se através da Tabela 12, que a chapa, após os testes balísticos, apresenta um aumento significativo de dureza na região tangente aos impactos.

Tabela 12 – Microdureza da chapa sem revestimento por regiões

valores de microdureza (HV)					
Regiões tangentes ao impacto	269	229	251	249	230
Regiões não alteradas pelo impacto	142	150	147	147	151

Fonte: Próprio autor

6 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos e considerando todo o processo de execução deste trabalho, conclui-se que:

- Entre os materiais comparados no presente estudo, a chapa SAE 1020, com espessuras iguais ou superiores a 25,4 mm, é a mais indicada, para aplicação em blindagem balística de nível III ou menor, por obter propriedades mecânicas suficientes para tal emprego e o melhor desempenho em linha de tiro, resistindo aos impactos de calibre 7,62 mm;
- A chapa, revestida, submetida ao processo de revenimento, resistiu parcialmente aos impactos balísticos;
- A chapa revestida, sem revenimento, não resistiu aos impactos balísticos;
- A quantidade significativa de ferrita delta observada no revestimento, contribui para o comportamento frágil do material;
- As dimensões das chapas revestidas, aplicadas como blindagens balísticas, ficam restritas devido às distorções ocasionadas pelo processo de deposição por soldagem;
- A automatização do processo de revestimento é altamente recomendável, devido à maior precisão na execução dos ciclos de soldagem e maior praticidade oferecida;
- O fato das chapas revestidas obterem menores espessuras, quando comparadas à chapa não revestida, contribuiu para o menor desempenho das mesmas;
- A fabricação de blindagens, utilizando chapas revestidas por soldagem, é um processo improdutivo, tendo em vista os consideráveis custos envolvidos e o elevado tempo de processamento, aliados às limitações de dimensões dos materiais aplicados e à disponibilidade de outros materiais mais compensadores no mercado.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, são apontados os seguintes temas:

- Estudo comparativo, quanto ao desempenho balístico, utilizando polímeros para revestimentos em chapas metálicas;
- Estudo sobre a influência, quanto ao desempenho balístico, de diferentes tratamentos térmicos e termoquímicos, aplicados em chapas de aço;
- Estudo comparativo, sobre chapas de aço sobrepostas, no desempenho balístico de chapas revestidas; e
- Análise de chapas de aço, quanto ao desempenho balístico, utilizando munições de diferentes calibres.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, NBR. 15000. **Blindagens para impactos balísticos—Classificação e critérios de avaliação**, 2005.

ALVES, Andreia LS; NASCIMENTO, Lucio FC; SUAREZ, João Carlos Miguez. Comportamento balístico de compósito de polietileno de altíssimo peso molecular: efeito da radiação gama. **Polimeros Ciência e Tecnologia**, v. 14, n. 2, p. 105-111, 2004.

ASM HANDBOOK. **Volume 4: Heat Treating**. 10ª edição. ASM International, 1991.

ASM METALS HANDBOOK, vol. 1. Properties and Selection Irons, Steel, and HighPerformance Alloy, 2005.

AWS, D1. D1. 3-Structural Welding Code-Sheet Steel. **American Welding Society**, 1998.

AWS WELDING HANDBOOK. 1991. **Materials and Applications**. 8ed. USA: American Welding Society (AWS). v3.

BACKMAN M.E, GOLDSMITH W. **The mechanics of penetration of projectiles into targets**. International Journal of Impact Engineering; 16:1–99 1978

BERALDO, C.H. **Efeito da temperatura de envelhecimento sobre as propriedades mecânicas e resistência à corrosão por pite do aço inoxidável martensítico endurecido por precipitação UNS S46500** Dissertação de Mestrado. São Paulo: USP, 2013.

BERNARDELLI, A.E. **Tratamento Concomitante de Nitretação e Envelhecimento a Plasma do Aço Ferramenta Inoxidável 15-5 PH**. Dissertação de Mestrado. Curitiba: UTFPR, 2007.

BOND, Danielle; BECKER, Sueli Fischer; D'OLIVEIRA, Ana Sofia. Evaluation of deposition current and powders grain size during PTA welding. **Soldagem & Inspeção**, v. 16, n. 1, p. 53-61, 2011.

CARROUGE, D.; BHADSHIA, H. K. D. H.; WOOLLIN, P. Effect of δ -ferrite on impact properties of supermartensitic stainless steel heat affected zones. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 9, n. 5, p. 377-389, 2004.

CHOO, Seong-Hun; BAEK, Eung-Ryul; LEE, Sunghak. Ballistic impact behavior of multilayered armor plates processed by hardfacing. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 27, n. 10, p. 3335-3340, 1996.

CLÉRIGO, Ricardo Jorge de Sousa et al. **Resposta dinâmica de alvos com núcleos de espuma revestida**. 2010. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro.

DAVIS, J. R. "Hardfacing, weld cladding, and dissimilar metal joining." *ASM International, ASM Handbook*. 6 (1993): 789-829.

DA SILVA, M. V. et al. Blindagens Cerâmicas para Aplicações Balísticas: Uma Revisão. **Cerâmica**, v. 60, p. 323-331, 2014.

Defesa Aeronaval. Monitor Parnaíba, 2016. Disponível em: <http://www.defesaaereanaval.com.br/tag/monitor-parnaiba-u-17?print=print-page>. Acesso em: 19 de janeiro de 2017.

FERREIRA FILHO, Demostenes; DE SAIRRE BÁLSAMO, Paulo Sérgio; FERRARESI, Valtair Antonio. INFLUÊNCIA DO TIPO DE GÁS DE PROTEÇÃO DA SOLDAGEM MIG/MAG NA QUALIDADE DO CORDÃO DE AÇO INOXIDÁVEL. 2013.

GAMA, Bazle A. et al. Aluminum foam integral armor: a new dimension in armor design. **Composite Structures**, v. 52, n. 3, p. 381-395, 2001.

GARZON LAMA, José Luis. Metodologia de análise aplicada a ensaios de impacto com alvos metálicos. 2013.

GELLERT, E. P.; PATTIE, S. D.; WOODWARD, R. L. Energy transfer in ballistic perforation of fibre reinforced composites. **Journal of materials science**, v. 33, n. 7, p. 1845-1850, 1998.

GOTTARDO, Ismael André; FISCHER, Cleges; DE PARIS, Aleir Antonio Fontana. A influência de gases de proteção na soldagem de aço inox 304 com arame tubular. In: **4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. 2007.

HENKE, Sérgio L.; PAREDES, Ramon SC; CAPRA, André R. Desenvolvimento da ferrita delta na solda e ZTA resultante de soldagem plasma pulsada em um aço inoxidável supermartensítico. **Soldagem e Inspeção**, v. 18, n. 1, p. 57-63, 2013.

JOHN, Lippol; DAMIAN, J. Kotecki. Welding metallurgy and weldability of stainless steels. 2005.

JÚNIOR, W. F. A. et al. Comportamento sob impacto balístico de um sistema compósito para blindagem. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 1, n. 1, p. 12-18, 2006.

JUSSILA, J. **Wound ballistic simulation: Assessment of the legitimacy of law enforcement firearms ammunition by means of wound ballistic simulation**. 2005. 112 f, Tese (Conclusão de curso) - University of Helsinki, Faculty of Medicine, Institute of Clinical Medicine, Helsinki, 2005.

LOURO, Luís Henrique Leme; GOMES, Alaelson Vieira; DA COSTA, Carlos Roberto Corrêa. MATERIAL CERÂMICO PARA EMPREGO EM BLINDAGEM.

MCGUIRE, M. **Stainless Steels for Design Engineers**. Ohio: ASM International, 2008.

MIRANDA, Edvan Cordeiro de. **Revestimentos de Ligas de Níquel depositados pelo Processo Plasma Pó para aplicações na Indústria do Petróleo e Gás**. Tese de Doutorado. Fortaleza: UFC, 2014.

MORAIS, V.L. **Estudo Comparativo da Deformação a Frio e da Resistência à Corrosão nos Aços Inoxidáveis Austeníticos AISI 201 E AISI 304**. Dissertação de Mestrado. São Paulo: USP, 2010.

PLANT, William HD et al. The Cost Effective Use of Nickel Alloys and Stainless Steels for Chimneys (Stacks) in Air Pollution Control Systems. In: **CORROSION 2000**. NACE International, 2000.

PEREIRA, Aldo Santos et al. **Desenvolvimento de procedimento de reparo por soldagem em aços inoxidáveis martensíticos, com metal de adição similar sem TTP**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

REBAK, R. B. 2004. Environmentally Assisted Cracking of Nickel Alloys – A Review. In: Environment Induced Cracking of Metals – 2. Banff, Canada. Published by Elsevier. September, 2004.

SAWCZEN, T. **Caracterização Eletroquímica e Proposta de Metodologia para Determinação da Temperatura Crítica de Pite de Aços Inoxidáveis Super Dúplex UNS S32760**. Dissertação de Mestrado. São Paulo: USP, 2014.

SHIN, Yun-ho; CHUNG, Jung-hoon; KIM, Jong-Hwan. Test and estimation of ballistic armor performance for recent naval ship structural materials. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, 2017.

SCOTTI, Américo; PONOMAREV, Vladimir. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. Artliber, 2008.

SHERMAN, Dov; BRANDON, D. G. The ballistic failure mechanisms and sequence in semi-infinite. supported alumina tiles. **Journal of materials research**, v. 12, n. 05, p. 1335-1343, 1997.

SILVA, M. E. **Estudo da correlação entre o aporte térmico, as propriedades magnéticas e a corrosão sob tensão em juntas soldadas de aço inoxidável ferrítico AISI-409**. 2011. Tese de Doutorado. Tese de doutorado-Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.2011.

SOARES, Helio Coelho Guimaraes. Estudo de sequências de soldagem para redução e eliminação de distorções. 2006.

SOUZA, E.R.S. Estudo do comportamento microestrutural e balístico de um aço de blindagem após soldagem. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: IME, 2014.

STANDARD, N. I. J. 0108.01: Ballistic Resistant Protective materials. **US Department of Justice. National Institute of Justice**, 1981.

SUDHAKAR, I. et al. Enhancement of wear and ballistic resistance of armour grade AA7075 aluminium alloy using friction stir processing. **Defence Technology**, v. 11, n. 1, p. 10-17, 2015.

TARNG, Y. S.; JUANG, S. C.; CHANG, C. H. The use of grey-based Taguchi methods to determine submerged arc welding process parameters in hardfacing. **Journal of materials processing technology**, v. 128, n. 1, p. 1-6, 2002.

WANG, P. et al. Effect of delta ferrite on impact properties of low carbon 13Cr–4Ni martensitic stainless steel. **Materials Science and Engineering: A**, v. 527, n. 13-14, p. 3210-3216, 2010.

WOLFART, M.J. **Nitretação a Plasma do Aço ABNT 316L em Baixas Temperaturas**. Tese de Doutorado. Porto Alegre: UFRGS, 2002.

WU, Weite; WU, Lung-Tien. The wear behavior between hardfacing materials. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 27, n. 11, p. 3639-3648, 1996.

YADAV, S.; RAVICHANDRAN, G. Penetration resistance of laminated ceramic/polymer structures. **International Journal of Impact Engineering**, v. 28, n. 5, p. 557-574, 2003.

ZILIO, Gabriel Botelho et al. Influência do gás de proteção e condições de soldagem na diluição e molhabilidade de cordões de solda de aço inoxidável e liga de níquel depositados pelo processo MIG/MAG. 2014.

ZOOK, J.A., KONRAD, F., SILSBY, G.F., **Terminal ballistics tests and analysis guidelines for the penetration mechanics branch**, Memorandum Report BRL-MR-3960, U.S. Army Laboratory Command, 1992.

9 BIBLIOGRAFIA

CALLISTER, W.D.; RETHWISCH, D.G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 8ª edição. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2012.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7ª edição. São Paulo: Editora ABM, 2005.

JOHN, Lippol; DAMIAN, J. Kotecki. **Welding metallurgy and weldability of stainless steels**. 2005.

MEI, P.R.; COSTA E SILVA, A.L. **Aços e Ligas Especiais**. 3ª edição. São Paulo: Editora Blucher, 2010.

MODENESI, Paulo José; MARQUES, Paulo Villani; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem-fundamentos e tecnologia**. Editora UFMG, 2005.

SCOTTI, Américo; PONOMAREV, Vladimir. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. Artliber, 2008.

TELLES; P.S. **Materiais Equipamentos de Processo**. 6ª edição. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2003.