



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE CIÊNCIAS APLICADAS



CINTHIA CRISTINA CALHI KLEINER

**AVALIAÇÃO DA DUREZA DO AÇO ASTM A182-P22 APÓS
SIMULAÇÃO FÍSICA DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR
ATRITO DE PINO NÃO CONSUMÍVEL QUANDO
SUBMETIDO A DIFERENTES CICLOS TÉRMICOS.**

Limeira
2017



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE CIÊNCIAS APLICADAS



CINTHIA CRISTINA CALCHI KLEINER

**AVALIAÇÃO DA DUREZA DO AÇO ASTM A182-P22
APÓS SIMULAÇÃO FÍSICA DO PROCESSO DE
SOLDAGEM POR ATRITO DE PINO NÃO CONSUMÍVEL
SUBMETIDO A DIFERENTES CICLOS TÉRMICOS.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para a
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Manufatura à Faculdade de
Ciências Aplicadas da Universidade
Estadual de Campinas.

Orientador(a): Prof. Dr. Rodrigo José Contieri

Limeira
2017

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): Não se aplica.

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Faculdade de Ciências Aplicadas
Renata Eleuterio da Silva - CRB 8/9281

K673a Kleiner, Cinthia Cristina Calchi, 1994-
Avaliação da dureza do aço ASTM A182-P22 após simulação física do processo de soldagem por atrito de pino não consumível quando submetido a diferentes ciclos térmicos / Cinthia Cristina Calchi Kleiner. – Limeira, SP : [s.n.], 2017.

Orientador: Rodrigo José Contieri.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Ciências Aplicadas.

1. Solda e soldagem. 2. Indução eletromagnética. 3. Dureza. I. Contieri, Rodrigo José, 1979-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Ciências Aplicadas. III. Título.

Informações adicionais, complementares

Título em outro idioma: Evaluation of the hardness of ASTM A182-P22 steel after physics simulation of the friction stir welding subjected to different thermal cycles

Palavras-chave em inglês:

Welding

Inductive coil

Hardness

Titulação: Bacharel em Engenharia de Manufatura

Banca examinadora:

Ricardo Floriano

Data de entrega do trabalho definitivo: 24-11-2017

Autor: Cinthia Cristina Calchi Kleiner

Título: Avaliação da dureza do aço ASTM A182-P22 após simulação física do processo de soldagem por atrito de pino não consumível submetido a diferentes ciclos térmicos.

Natureza: Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Manufatura

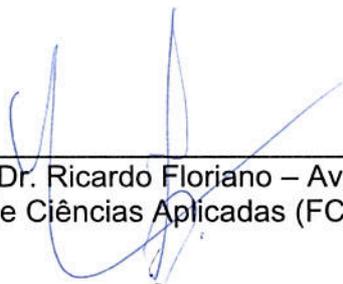
Instituição: Faculdade de Ciências Aplicadas, Universidade Estadual de Campinas

Aprovado em: 24/11/17.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Nome Rodrigo José Contieri – Presidente
Faculdade de Ciências Aplicadas (FCA/UNICAMP)



Prof. Dr. Ricardo Floriano – Avaliador
Faculdade de Ciências Aplicadas (FCA/UNICAMP)

Este exemplar corresponde à versão final da monografia aprovada.



Prof. Dr. Rodrigo José Contieri
Faculdade de Ciências Aplicadas (FCA/UNICAMP)

Aos meus pais

AGRADECIMENTOS

Agradeço àqueles que colaboraram de maneira direta e indireta com a conclusão e o andamento deste trabalho. Agradeço, especificamente:

A UNICAMP, por me abrir as portas para a pesquisa.

Ao meu orientador, Prof Dr Rodrigo José Contieri pela orientação, incentivo e disposição em auxiliar neste trabalho.

Ao LnNano/CNPEM por disponibilizar sua infraestrutura para o desenvolvimento.

Aos integrantes do grupo de Caracterização e Processamento de Metais do LnNano, pela colaboração com este trabalho.

Ao Mestre Eduardo Bertoni da Fonseca pela ajuda em todos os momentos da evolução deste trabalho e principalmente pela fantástica maneira de incentivar e compartilhar conhecimento.

À Eng Thaís Alonso, pelo apoio com a simuladora termomecânica e pela orientação durante o estágio no grupo CPM.

Ao Mestre Julián David Esboar Atehortúa pela ajuda com o ThermoCalc e interpretação de resultados.

Aos Eng Rafael Arthur Giordão, pelas simulações computacionais e os diversos auxílios durante a execução deste trabalho.

À Dra Maysa Terada pela ajuda com o microscópio eletrônico de varredura.

Aos técnicos Joel de Alencar e Matheus Silva pelas diversas dicas durante a execução do trabalho.

Aos meus pais, por me incentivarem a sempre fazer o melhor.

E ao Eduardo Rocha de Andrade pela amizade e incentivos diários.

“Nada na vida deve ser temido, apenas compreendido. Agora é a hora de compreender mais para temer menos”
Marie Curie

KLEINER, Cinthia Cristina Calchi. Título: Avaliação da dureza do aço ASTM A182-P22 após simulação física do processo de soldagem por atrito de pino não consumível submetido a diferentes ciclos térmicos. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Manufatura) – Faculdade de Ciências Aplicadas. Universidade Estadual de Campinas. Limeira, 2017.

RESUMO

O processo de soldagem por atrito de pino não consumível (SAPNC), devido as suas vantagens perante a soldagem convencional, tem sido desenvolvido em diversas partes pelo mundo. Quando se trata de aços, o processo desenvolve um comportamento semelhante ao da têmpera, ocasionando em uma microestrutura com morfologia de martensita bruta, assim o material apresenta elevada dureza e baixa tenacidade à fratura, condições que podem fazer com que o material não se torne interessante para diversas aplicações industriais. O presente trabalho, tem como objetivo estudar o comportamento da dureza do aço ASTM A182 P 22 submetido à diferentes ciclos térmicos. Para tanto, estuda-se a possibilidade de reduzir a dureza do material de trabalho através do emprego de uma bobina indutora para proporcionar modificações no comportamento térmico do processo. Com o estudo realizado, percebe-se que alterar as taxas de resfriamento não causa mudança significativa na dureza do material, contudo, quando a bobina indutora é utilizada realizando revenimento à 720 °C, há modificações significativas nesta propriedade do material mesmo que os tempos de revenimento sejam pequenos.

Palavras-chave: Solda e soldagem; Revenimento; Indução eletromagnética; Simulação física; Dureza.

KLEINER, Cinthia Cristina Calchi. Evaluation of the hardness of ASTM A182-P22 steel after physics simulation of the friction welding process of non-consumable pin subjected to different thermal cycles. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Manufatura.) – Faculdade de Ciências Aplicadas. Universidade Estadual de Campinas. Limeira, 2017.

ABSTRACT

The Friction Stir Welding (FSW), due to its advantages over conventional welding process, has been developed in several parts of the world. When it comes to steel, the process develops a behavior similar to that of quenching, resulting in a microstructure with morphology of brute martensite. Therefore, the material presents high hardness and low fracture toughness, conditions that may cause the material not to become interesting for various industrial applications. The present work aims to study the hardness behavior of ASTM A182 P 22 steel subjected to different thermal cycles. For this, it is studied the possibility of reducing the hardness of the working material through the usage of an inductive coil to provide modifications in the thermal behavior. With the study carried out, it is noticed that changing the cooling rates does not cause a significant change in the hardness of the material, however, when the induction coil is used by tempering the material at 720°C, there are significant modifications in the property of the material, even though the process's time is small.

Keywords: Welding.Tempering. Inductive Coil. Physics Simulation. Hardness.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01	Diagrama TRC Aço ASTM A182-F22.....	22
Figura 02	Desenho esquemático SAPNC.....	24
Figura 03	Exemplo de cordão de solda gerado por SAPNC, em evidência: furo ocasionado pela retirada da ferramenta.....	25
Figura 04	Seção transversal de uma junta soldada pelo processo de SAPNC.....	28
Figura 05	Comparativo entre tempos de aquecimento em fornos convencionais e por indução eletromagnética.....	29
Figura 06	Densidade de corrente (a) e densidade de potência (b) em função da distância da superfície da peça de trabalho.....	33
Figura 07	Metodologia experimental empregada.....	37
Figura 08	Montagem utilizada para obter parâmetros relacionados ao processo de indução.....	39
Figura 09	Simulação computacional do gradiente térmico presente no processo de SAPNC em conjunto com a ação da bobina indutora.....	41
Figura 10	Simulador termomecânica Gleeble 3800, presente no laboratório Nacional de Nanotecnologia	43
Figura 11	Esquema de montagem do corpo de prova para simulação física na Gleeble.....	43
Figura 12	Ciclo térmico da soldagem que foi realizado na Gleeble 3800.....	44
Figura 13	Ciclo térmico composto pelo processo de SAPNC em conjunto com o tratamento de revenimento. Patamar de revenimento de 60 minutos. As curvas azul e vermelha representam o ciclo térmico do processo de SAPNC e o de revenimento, respectivamente.....	45
Figura 14	Ciclo térmico do indutor.....	46

Figura 15	Cordão obtido em processamento realizado com velocidade de rotação de 200 rpm, velocidade de avanço de 100mm/min e força em Z de 20kN.....	48
Figura 16	Macrografia de cordão de solda processado com velocidade de rotação de 200 rpm, velocidade de avanço 100mm/min e força axial de 20kN.....	49
Figura 17	Microestrutura do material processado (A) Aumento de 200x. (B) Aumento de 500x. Ataque Nital 2%.....	50
Figura 18	Linha de dureza de um cordão de solda processado com velocidade de rotação de 200 rpm, velocidade de avanço 100mm/min e força em Z de 20kN.....	51
Figura 19	Gráficos evidenciando a relação entre a corrente utilizada pelo indutor e as temperaturas obtidas durante o processo de aquecimento e resfriamento da chapa. Ensaios realizados em correntes de 10, 15, 20, 25, 30 A, sendo que o ensaio de 15A foi duplicado com a chapa em movimento.	52
Figura 20	Estimativa da porcentagem de fases presentes no processo de SAPNC.....	53
Figura 21	Porcentagem mássica dos elementos presentes no precipitado M23C6.....	54
Figura 22	Dilatometria obtida pelo ciclo térmico de SAPNC em conjunto com um revenimento de 30 minutos. As setas em azul representam a orientação das medidas do dilatômetro.....	55
Figura 23	Dilatação em função do tempo no ciclo térmico do revenimento. Em evidencia há o ponto em que o relaxamento da amostra, com suas respectivas coordenadas de tempo e dilatação evidenciadas no Data Display.....	56
Figura 24	Microscopia óptica do aço resfriado em diferentes taxas de resfriamento (a) 25 °C/s, (b) 50 °C/s, (c) 75 °C/s e (d) 100 °C/s. Ataque Nital 2%.....	57
Figura 25	Microscopia óptica do aço submetido a diferentes tempos de revenimento (a) 0 min (Sem revenimento), (b) 1 min, (c) 5 min, (d) 15min, (e) 30 min e (f) 60 min. Ataque Nital 2%.....	58

Figura 26	Microestrutura do corpo de prova que sofreu processo de SAPNC em conjunto com o revenimento provido pela bobina indutora. Ataque Nital 2%.....	59
Figura 27	Corpo de prova que apenas sofreu a tempera intrínseca ao processo de SAPNC, sem sofrer posterior revenimento. A) Aumento de 2000x. B) Aumento de 10000x. Ataque Nital 2%.....	60
Figura 28	Corpo de prova que após o processo de SAPNC passou por revenimento por 1 minuto. A) Aumento de 2000x. B) Aumento de 10000x. Ataque Nital 2%.....	61
Figura 29	Corpo de prova que após o processo de SAPNC passou por revenimento por 5 minutos. A) Aumento de 2000x. B) Aumento de 10000x. Ataque Nital 2%.....	61
Figura 30	Corpo de prova que após o processo de SAPNC passou por revenimento por 15 minutos. A) Aumento de 2000x. B) Aumento de 10000x. Ataque Nital 2%.....	62
Figura 31	Dureza do material em função das taxas de resfriamento de 25, 50, 75 e 100 °C/s.....	63
Figura 32	Média das durezas obtidas nos corpos de prova relacionados ao revenimento nos tempos de 0 (sem revenimento, apenas com o processo natural de SAPNC), 01, 05, 15, 30 e 60 minutos.....	64
Figura 33	Comparativo entre a influência do indutor e do revenimento por 1 minuto na redução da dureza do processo.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 01	Composição química do Aço ASTM A182-F22.....	20
Tabela 02	Propriedades mecânicas do aço A182- P22.....	20
Tabela 03	Parâmetros de tratamento exigidos pela norma ASTM 182.....	21
Tabela 04	Composição química em %p de massa do material analisado.....	36
Tabela 05	Coefficientes para condições de transferência de calor.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abreviações:

CP	Corpo de prova
FSW	Soldagem por atrito (<i>friction stir welding</i>)
LA	Lado de avanço
LR	Lado de retrocesso
MB	Metal de base
PCBN	Nitreto cúbico de boro <i>poli</i> cristalino (<i>Polycrystalline Cubic Boron Nitride</i>)
SAPNC	Soldagem por atrito com pino não consumível
W-Re	Tungstênio- Rênio
ZM	Zona misturada
ZTA	Zona termicamente afetada (<i>heat affected zone</i>)
ZTMA	Zona termomecanicamente afetada (<i>thermomechanically affected zone</i>)

Siglas:

ASTM	Sociedade Americana para Ensaios de Materiais
CNPEM	Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais
CPM	Caracterização e Processamento de Metais
LNNano	Laboratório Nacional de Nanotecnologia
TWI	<i>The Welding Institute</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Φ	Fluxo magnético
E	Tensão Induzida
N	Número de espiras da bobina
t	Tempo
δ	Profundidade de penetração
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo
μ	Permeabilidade magnética do material
ρ	Resistividade elétrica do metal
f	Frequência do campo magnético
x	Distância em relação à superfície
J_x	Densidade da corrente para distância x da superfície
J_s	Densidade da corrente na superfície da peça
W_x	Densidade de potência para uma distância x da superfície
W_s	Densidade de potência na superfície da peça

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	Considerações iniciais.....	17
1.2	Objetivos.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	Aço ASTM A182- P22.....	19
2.2	Soldagem por atrito de pino não consumível.....	22
2.2.1	Soldagem por atrito de pino não consumível em aços.....	25
2.2.2	Parâmetros de processo.....	26
2.2.3	Características da junta soldada.....	27
2.3	Aquecimento por indução eletromagnética.....	29
2.3.1	Princípios do aquecimento por indução.....	30
2.4	Têmpera e revenimento.....	34
2.5	Simulação física.....	35
3.0	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	36
3.1	Material utilizado.....	36
3.2	Esquema de metodologia experimental	36
3.3	Parâmetros de indução.....	37
3.4	Simulação computacional.....	40
3.5	Simulação Física.....	41
3.6	Corpo de prova.....	46
3.7	Caracterização microestrutural.....	47
3.8	Microdureza.....	47
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
4.1	Material processado.....	48
4.1.1	Parâmetros de processamento.....	48
4.1.2	Microscopia Óptica.....	49
4.1.3	Microdureza.....	50
4.2	Simulação física.....	51
4.2.1	Parâmetros de indução.....	51

4.2.2	ThermoCalc.....	52
4.2.3	Dilatometria.....	54
4.2.4	Microscopia Óptica.....	56
4.2.5	Microscopia Eletrônica de Varredura.....	60
4.2.6	Microdureza Vickers.....	62
5.0	CONCLUSÃO.....	66
6.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O processo de soldagem por atrito de pino não consumível (SAPNC), também conhecido como friction stir welding (FSW), foi desenvolvido na década de 1990 pelo The Welding Institute (TWI) na Inglaterra. Atualmente, devido às suas vantagens perante a soldagem convencional, a SAPNC, tem sido desenvolvida em diversas partes do mundo.

Quando se trata de material com alto ponto de fusão, como é o caso do aço, o desempenho da técnica se torna limitado devido à escassez de ferramentas resistentes ao processo em condições superiores a 1000°C (CHOI et al, 2011). Contudo, devido à alta empregabilidade de aços na indústria, o estudo da técnica de SAPNC aplicada nestes materiais tem amadurecido.

Um dos problemas encontrados quando se trata de aços, é que este tipo de processo ocorre em elevadas temperaturas e em seguida, possui altas taxas de resfriamento. Este comportamento promove transformações martensíticas no material trabalhado, fazendo com que o mesmo adquira uma elevada dureza e uma baixa tenacidade à fratura, o que, em muitas aplicações industriais pode ser um grande impasse para a aplicação do mesmo.

O presente estudo, teve como finalidade investigar a influência dos ciclos térmicos presentes no processo de SAPNC e como estes influenciam na microestrutura formada no aço ASTM A182 P 22. Busca-se encontrar uma alternativa para reduzir a dureza do material e preservar sua tenacidade à fratura. Desta forma, estuda-se a possibilidade de agregar um indutor eletromagnético durante/após o processo a fim de modificar o ciclo térmico sofrido pelo material e conseqüentemente, alterar as propriedades do aço após processamento.

1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são:

- Avaliar a influência do acoplamento de uma bobina de indução eletromagnética em conjunto com a ferramenta de soldagem por atrito de pino não consumível, com o intuito de reduzir as taxas de resfriamento do processo. Através de simulações físicas serão avaliadas as durezas do material ASTM A182-P22 submetido às diferentes taxas de resfriamento de 25,50,75 e 100 C°/s.
- Estudar o comportamento da dureza e microestrutura do material quando submetido a um tratamento de revenimento na temperatura de 720 °C nos patamares de 1, 15, 30 e 60 minutos.
- Estudar a possibilidade de utilizar a bobina indutora realizando o tratamento de revenimento após o processo de soldagem por atrito de pino não consumível.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aço A182 F/P22

Aços baixa liga possuem quantidade total de elementos de liga entre 1,5 e 5%p, sendo caracterizados pela baixa porcentagem de elementos de liga em sua composição. Estes elementos são adicionados de maneira proposital, e têm a finalidade de fornecer melhorias em parâmetros como resistência mecânica, fluência, tenacidade e resistência a oxidação. Tais tipos de aço, costumam ter quatro ou cinco elementos de liga, sendo os mais comuns: cromo, manganês, níquel, molibdênio, vanádio e silício.

A família 2,25-Cr-1Mo apresenta elevada resistência a corrosão e a fluência, além de boa tenacidade. Portanto, são interessantes para a indústria petroquímica, sendo amplamente utilizados em tubulações, caldeiras, vasos de pressão, entre outras aplicações. A presença de cromo faz com que a liga tenha elevada resistência a oxidação. Por outro lado, o molibdênio a torna resistente à deformação em elevadas temperaturas, devido à presença de seus carbonetos que aumentam a resistência à fluência. Ademais, a boa soldabilidade deste aço é garantida pelo baixo teor de carbono do mesmo, não ultrapassando 0,2%p (PINHEIRO, 2014).

O aço ASTM A182 F/P22 é classificado como um aço carbono baixa liga, pertencendo a família 2,25Cr-1Mo. Possui carbonetos estáveis em seus contornos de grão, favorecendo aplicações do mesmo em altas temperaturas (OLIVEIRA, 2013). A classificação F22 é referente ao material em estado forjado, e o mesmo, quando está na forma de tubo, é classificado como P22. A composição química do material se encontra presente na tabela 01, já as propriedades mecânicas estão apresentadas na tabela 02.

Tabela 01 – Composição química do aço A182- P22

Fonte: ASTM A182

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
0,05-0,15	0,30-0,60	0,025 Max	0,025 Max	0, 50 Max	1,90- 2,60	0,87- 1,130

Tabela 02 – Propriedades mecânicas do aço A182 – P22

Dureza (HV)	LE (MPa)	LRT (MPa)	%Área
200 Max	623 Max	771 Max	33 Max

Fonte: ASTM A182

Este material pode ser utilizado recozido, normalizado e revenido ou nas condições temperado e revenido. A norma ASTM 182 fornece os parâmetros de tratamento e as solicitações mecânicas mínimas exigidos para este tipo de aço. Estes se encontram enunciados na tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros de tratamento exigidos pela norma ASTM 182

ASTM A 182- F22	Classe 1	Classe 3
Tratamento térmico	Recozido	Normalizado e revenido
Temp. Austenitização (°C)	900	900
Resfriamento	Forno	Ar
Temp. Revenimento (°C)	-	675
Limite de resistência a tração (MPa)	415 mín	515 mín
Limite de escoamento (MPa)	205 mín	310 mín
Alongamento (50mm) (%)	20 mín	20 mín
Dureza (HB)	170 máx	156-207

Fonte: ASTM 182

Aços ASTM A182 F22 possuem extensa temperabilidade bainítica, como ilustrado no diagrama de transformações por resfriamento contínuo (TRC) apresentado na figura 01. Possuindo uma microestrutura típica bainítica, ilustrada na figura 01.

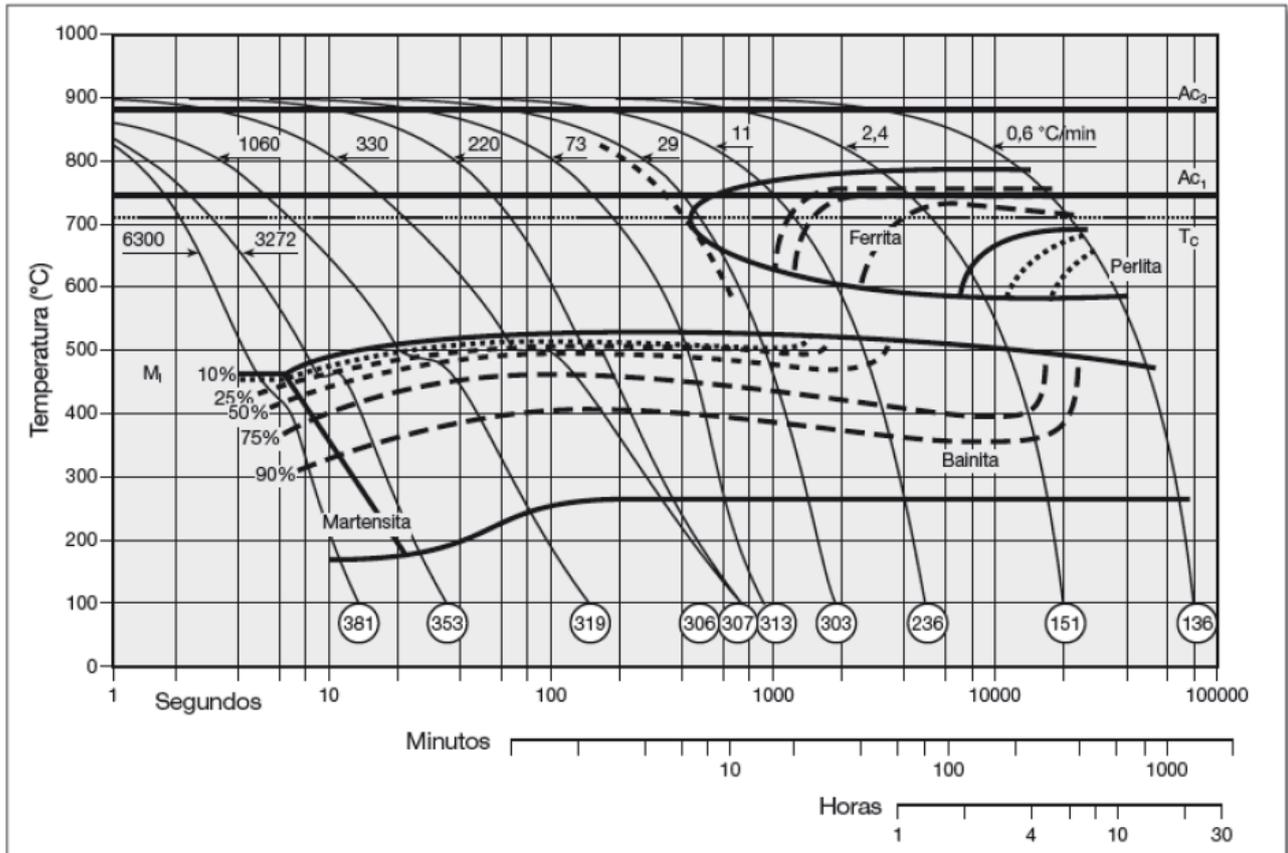


Figura 01 - Diagrama TRC Aço ASTM A182-F22. Fonte: (Colpaert, 2008)

2.2 Soldagem por atrito de pino não consumível

O processo de soldagem por atrito de pino não consumível (SAPNC), também conhecido por *friction stir welding* (FSW), foi desenvolvido no *The Welding Institute* (TWI) em 1991 por Thomas Wayne na Inglaterra (THOMAS, 1991). SAPNC teve início com a soldagem de alumínio e a utilização de máquinas fresadoras. Com a evolução da técnica, novas máquinas foram desenvolvidas, garantindo maior eficiência no controle dos parâmetros de processos como força, velocidade de avanço e temperatura. Desta maneira, esta técnica de soldagem alcançou utilizações mais complexas. (ABERGAST, 2008).

O processo é caracterizado pela união de materiais em estado sólido, trabalhando em temperaturas abaixo da temperatura de fusão. Utiliza a rotação de uma ferramenta não consumível para produzir calor ao mesmo tempo em que uma deformação é imposta ao material, sendo capaz de plastificar todo o metal das

redondezas (SANTOS, 2016). A técnica, possui diversos processos termomecânicos, onde a interação destes influenciam nas taxas de resfriamento e aquecimento, deformação plástica e escoamento de material. Desta forma, possuem influência na microestrutura gerada e qualidade da junta soldada (SU,2003). A influência destes processos provém uma zona misturada com refinamento de grão quando comparado com o metal de base.

A ferramenta utilizada é constituída de um ombro e um pino onde o primeiro é responsável por gerar calor e aplicar uma força compressiva sobre a superfície abaixo do mesmo e o segundo deve misturar o material. O instrumento deve ser introduzido na superfície da peça e realiza movimento de avanço associado com a rotação do mesmo, estabelecendo um cordão de solda a partir da mistura e da plastificação dos materiais de união (FONSECA, 2016). O esquema do processo é apresentado na Figura 02.

Ao ser introduzido na superfície da ferramenta, o pino permanece estático por um determinado tempo, neste período, ocorre transferência de calor entre o pino e o material de trabalho, pré-aquecendo a superfície. Desta forma, ocorre diminuição no atrito entre o material e a ferramenta, fazendo com que a mesma flua mais facilmente sobre a superfície. As forças predominantes durante o processo de SAPNC são a força de avanço, responsável pelo surgimento do cordão de solda, resultante da resistência do material ao movimento da ferramenta; a força axial (força de contato), responsável por manter a ferramenta em contato com o material trabalhado. Também existe a influência do torque, o qual possui ação na mistura do material (THEODORO, 2013).

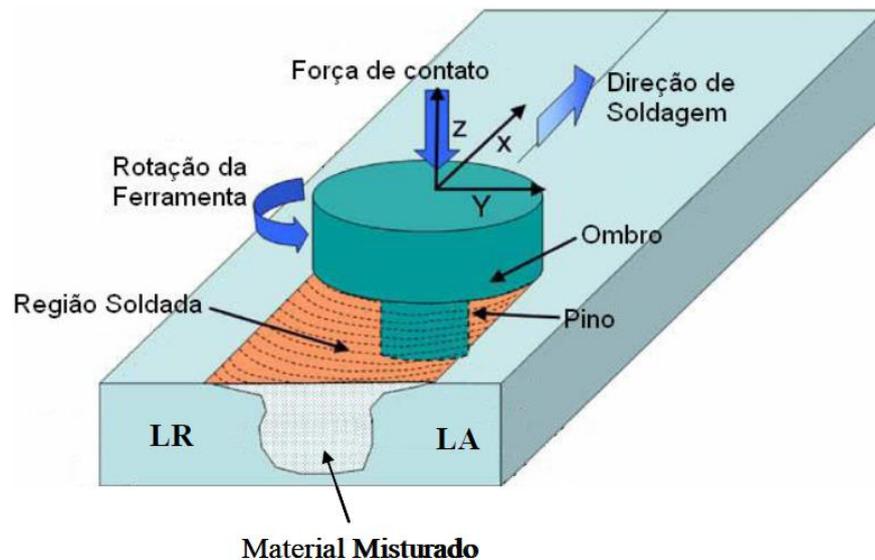


Figura 02 - Desenho Esquemático processo SAPNC (MISHRA 2005- Adaptada HERMENEGILDO 2012)

Como SAPNC se trata de uma técnica de união em estado sólido, dentre as vantagens desta, ressalta-se a diminuição e em alguns casos a eliminação de macro e micro defeitos oriundos do processo de fusão e solidificação do metal, tais como trincas, porosidades e tensão residual. Ademais, evita-se a fragilização por hidrogênio ocasionada em aços (MISHRA, 2007).

Este método produz bom acabamento superficial no cordão de solda, além de ser de fácil reprodutibilidade, podendo ainda ser totalmente automatizado. Devido a eficiência energética da técnica quando comparada com os processos convencionais de soldagem, é considerada como uma tecnologia verde. SAPNC não utiliza material de adição para formular a junta soldada. Durante a soldagem de alguns materiais, fumos não são gerados durante o processo, sendo desnecessária a utilização de gases de proteção durante o método, no entanto, para o processamento de aços, estes gases devem ser utilizados. SAPNC também possui vantagem quando se trata da união de materiais dissimilares, pois o processo permite mudanças gradativas nas propriedades do material de trabalho. Desta maneira, a junta formulada não terá a presença dos defeitos característicos gerados através dos processos de soldagem convencionais, onde as mudanças são bruscas (MISHRA, 2007).

Apesar de suas vantagens, existem limitações do processo, as mais relevantes são: equipamento de elevado custo, sendo que o mesmo necessita de um bruto sistema de fixação com placa de apoio (*backing*). Ao fim da soldagem, a retirada da ferramenta ocasiona um furo na peça que estava sob processo (Figura 03). Ademais, pode-se utilizar ferramentas específicas para cada diferente conjunto a unir (ROSATO, 2003).

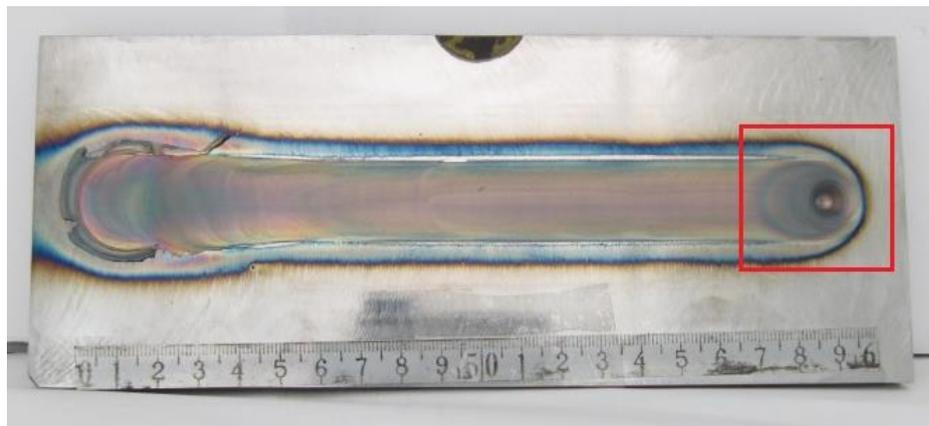


Figura 03: Exemplo de cordão de solda gerado por SAPNC, em evidência: furo ocasionado pela retirada da ferramenta.

2.2.1 Soldagem por atrito de pino não consumível em aço

A soldagem por atrito de pino não consumível teve seu início em aplicações com alumínio e suas ligas. Posteriormente, a técnica foi aplicada em outros materiais com baixo ponto de fusão, como o magnésio e suas ligas.

Quando se trata de materiais com alto ponto de fusão, como o aço e o titânio, a durabilidade da ferramenta é comprometida e o desempenho da técnica se torna limitado devido à escassez de ferramentas resistentes à temperatura e ao desgaste em condições superiores a 1000°C (CHOI et al, 2011). Encontrar o material adequado para constituir a ferramenta que irá realizar o processo em aço é uma tarefa desafiadora, visto que o mesmo deve possuir temperatura de fusão superior à do material a ser soldado (PRADEEP, 2012). No entanto, devido à elevada gama de

aplicações de aços na indústria, avanços no estudo da técnica de SAPNC estão ocorrendo e proporcionando amadurecimento da técnica.

Atualmente, para a soldagem em aços, é dominante o uso de ferramentas constituídas de PCBN (Polycrystalline Cubic Boron Nitride), visto que o cerâmico mostrou-se eficiente em atender as solicitações mecânicas oriundas do processo em alta temperatura, mostrando-se resistente ao desgaste físico e químico. Apesar disso, em determinados parâmetros de soldagem de materiais com elevado ponto de fusão, foi observada a fragilidade da ferramenta, devido a fratura da mesma. Desta maneira, iniciaram-se estudos para encontrar uma alternativa para a baixa tenacidade à fratura (PARK, 2009). Foi descoberto que uma matriz de W-Re (tungstênio-rênio) na composição de PCBN poderia ser uma alternativa para a tenacidade (STEEL, 2008).

Ademais, quando se trata de aços, o ciclo térmico imposto pela soldagem resulta em uma microestrutura semelhante a dos aços temperados. Sendo assim, após o processamento a microestrutura final apresenta morfologia de martensita “bruta”, proporcionando baixa tenacidade e dureza excessiva, características que podem tornar o material inutilizado em diversas aplicações (MARCOMINI, 2008).

2.2.2 Parâmetros do processo

O processo de SAPNC envolve diversos parâmetros que devem ser considerados, visto que os mesmos possuem influência direta com o cordão de solda e a microestrutura gerada, estes são: geometria da ferramenta, velocidade de avanço (VA, mm/min), velocidade de rotação (VR, rpm) , penetração da ferramenta (mm) e intensidade de forças (kN) (MISHRA, 2005).

- Geometria da ferramenta: atua no escoamento do material durante o processo e no calor gerado pela mesma, formulando o perfil transversal da junta soldada.
- Velocidade de rotação: possui influência sobre a deformação e conseqüentemente à mistura do material.

- Velocidade de avanço: responsável por controlar o tempo em que o material fica exposto à ação da ferramenta e também auxilia no controle do escoamento do material

Também há influência dos parâmetros associados à preparação da junta, neles estão inclusos: proteção contra oxidação, fixação e alinhamento de chapas ou tubos são outros parâmetros que devem ser considerados. Da mesma forma, deve-se atentar à inclinação da ferramenta, visto que a partir de uma inclinação satisfatória, o ombro da ferramenta é capaz de movimentar o material plastificado para a junta, auxiliando no escoamento de material (HERMENEGILDO, 2012).

2.2.3 Características da junta soldada

O procedimento da técnica envolve uma série de processos termomecânicos. Estes atuam nas taxas de aquecimento e resfriamento, recristalização, deformação plástica e escoamento do material. Desta maneira, são estes processos responsáveis pela evolução microestrutural e conseqüentemente pelas características da junta soldada (SU,2003).

A seção transversal da junta soldada pelo processo de SAPNC apresenta quatro regiões distintas: metal de base (MB), zona misturada (ZM), zona termomecanicamente afetada (ZTMA) e zona termicamente afetada (ZTA). A diferença entre elas se dá devido às distintas histórias térmicas e mecânicas que cada uma sofreu durante o processo, proporcionando microestruturas e conseqüentemente propriedades diferentes. Estas zonas estão ilustradas na Figura 04, o qual contém a seção transversal de uma junta soldada.

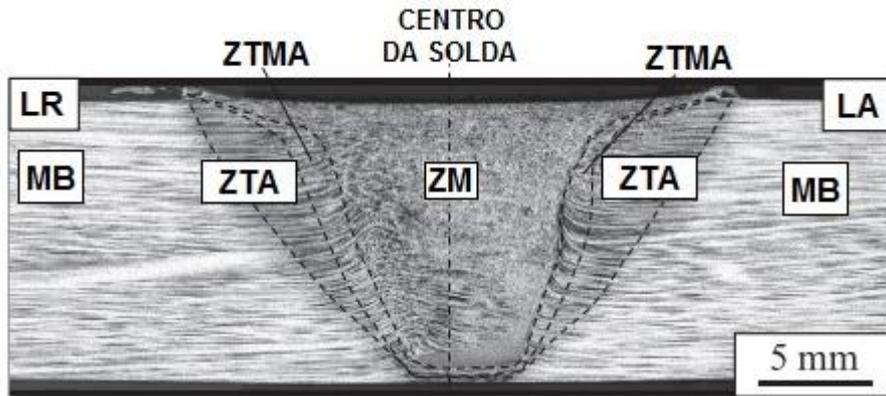


Figura 04- Seção transversal de uma junta soldada pelo processo de SAPNC. Fonte: Adaptado de (MATSUSHITA, 2015)

A região do metal de base é a zona em que não sofreu nenhuma influência do processo, continuando desta forma com propriedades e microestrutura intactas; A zona misturada é a região onde ocorreu a passagem da ferramenta. Em alguns materiais, esta região possui refinamento de grão, oriundos da elevada deformação plástica naquele local; A ZTMA é uma região adjacente à zona misturada. Esta zona sofre influência de temperatura e deformação simultaneamente. A ZTA é uma região em que a microestrutura apenas sofreu influência das variações de temperaturas ocasionadas pelo atrito entre a ferramenta e o metal soldado durante o processo de SAPNC. Nesta região não há influência da deformação plástica ocasionada pelo processo (FONSECA, 2013; THEODORO, 2013).

Com o escoamento não uniforme de material, a distribuição de temperatura se torna desigual, formulando uma junta soldada com lados assimétricos. Durante o processo, o pino realiza movimentos de rotação e translação e o sentido de atuação destes gera duas regiões características: o lado de avanço (LA) e o de retrocesso (LR). O lado de avanço é o lado em que avanço e rotação estão atuando no mesmo sentido. Já, o lado de retrocesso é caracterizado como a região em que o avanço da ferramenta ocorre em sentido contrário ao da rotação da mesma (FONSECA, 2013).

2.3 Aquecimento por indução eletromagnética

O aquecimento por indução eletromagnética tem como princípio a utilização de uma bobina o qual é alimentada por uma corrente alternada (AC) Esta corrente gera um campo magnético, cujas linhas de força penetram no material trabalhado. Com a variação do campo magnético, cria-se diferença de potencial magnético e esta é responsável por induzir a formação de correntes parasitas (DAVIES, 1979). O sistema de aquecimento por indução é relativamente simples, tendo como seus componentes básicos: a bobina indutora, uma fonte que irá fornecer corrente elétrica alternada (AC) e a peça que deverá ser aquecida (BASTOS, 2009).

Quando comparada com técnicas de aquecimento convencionais, a indução eletromagnética possui destaque devido a sua eficiência em aquecer o material trabalhado, visto que nesta técnica, a energia é aplicada somente na região da peça de trabalho que requer tratamento, reduzindo o tempo de aquecimento (GRUM, 2001). Na figura 05, tem-se um comparativo entre o tempo de aquecimento indutivo e o aquecimento convencional em um forno. Ademais, o processo de aquecimento por indução possui fácil controle e automação, além de condições de trabalho ergonômicas, por serem silenciosas e limpas (BASTOS, 2009).

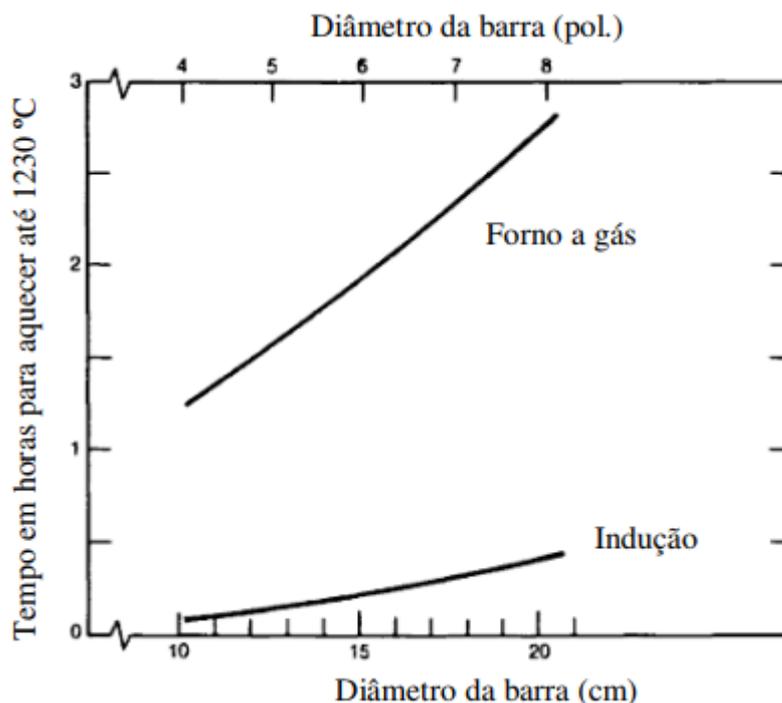


Figura 05: Comparativo entre tempos de aquecimento em fornos convencionais e por indução eletromagnética. (DAUGHERTY 1993 – adaptada por BASTOS 2009)

2.3.1 Princípios do aquecimento por indução:

Através da indução eletromagnética, o calor utilizado para aquecer uma peça é gerado pela própria peça. Uma corrente alternada é imposta sobre uma bobina indutora e, com a variação da corrente, formam-se linhas de campo magnético concentrado as quais induzem um campo elétrico na peça de trabalho. Desta forma, tem-se um circuito fechado, onde o fluxo de corrente flui através do potencial induzido e o aquecimento da peça decorre a partir da resistência intrínseca do material ao fluxo de correntes parasitas ou também conhecidas por correntes de Foucault (RUDNEV et al, 1997).

Segundo a lei de indução de Faraday representada na expressão 1, temos que se um condutor de eletricidade é colocado em contato com uma corrente alternada, um campo magnético alternado será gerado e o mesmo será o responsável pela indução de correntes elétricas parasitas no material condutor.

$$E = -N \, d\phi / dt \quad \text{(Expressão 01)}$$

Onde:

ϕ = Fluxo magnético

$d\phi / dt$ = taxa de alteração do fluxo magnético em relação ao tempo

E = Tensão induzida

N = Número de voltas na bobina

t = Tempo

A eficiência do aquecimento de indução está relacionada com os seguintes parâmetros: formato da bobina, número de espiras, intensidade aplicada de corrente alternada e frequência de trabalho (TUDBURY, 1960). A velocidade de aquecimento por indução é função do campo magnético o qual a peça é aplicada, assim, também é função das correntes parasitas (STEVENS, 1981). A partir do efeito pelicular, tem-se que a intensidade das correntes parasitas decresce em função da profundidade da peça, assim, são mais intensas na superfície (BASTOS, 2009)

Quando se deseja realizar aquecimento indutivo em uma pequena espessura, utiliza-se geralmente correntes de alta frequência, já quando se requer aquecimento em maiores espessuras, adota-se correntes de frequências baixas ou intermediárias (STEVENS, 1981). Logo, para obter controle da profundidade de aquecimento, deve-se trabalhar com os seguintes parâmetros:

- Frequência
- Tempo de aquecimento
- Distância entre bobina de indução e peça de trabalho
- Forma da bobina
- Taxa de alimentação do indutor

A profundidade de penetração da corrente elétrica em determinado material metálico pode ser obtida pela expressão (02). E quando se trata de uma chapa ideal e fina, o efeito da corrente induzida na profundidade de penetração (d) pode ser obtido pela função de Bessel, representado pela expressão (03).

$$\delta = (\rho / \pi \cdot \mu_0 \cdot \mu \cdot f)$$

(Expressão 02)

$$d = \rho \pi \cdot \mu_0 \cdot \mu \cdot f$$

(Expressão 03)

Onde:

 δ = profundidade de penetração μ_0 = permeabilidade magnética no vácuo μ = permeabilidade magnética do material ρ = resistividade elétrica do metal f = frequência do campo magnético

Densidade de corrente e de potência podem ser obtidas pelas expressões (04 e 05), respectivamente. A partir das equações, percebe-se que a densidade de corrente e densidade de potência são inversamente proporcionais à espessura do material de trabalho, sendo as mesmas mais intensas na superfície e mais brandas no centro do material.

$$\ln(a), J_x = J_s e^{-x/\delta},$$

(Expressão 04)

$$\ln(b), W_x = W_s e^{-2x/\delta},$$

(Expressão 05)

Onde:

 J_x = Densidade da corrente para distância x da superfície J_s = Densidade da corrente na superfície da peça W_x = Densidade de potência para distância x da superfície

W_s = Densidade da potência na superfície da peça

x = Distância em relação à superfície

d = Referência de profundidade da equação (03)

A partir das equações, obteve-se os gráficos presentes na Figura 06, os mesmos reforçam a conclusão de que densidade de corrente e densidade de potência perdem sua intensidade com o aumento da distância de penetração em referência a superfície da peça de trabalho.

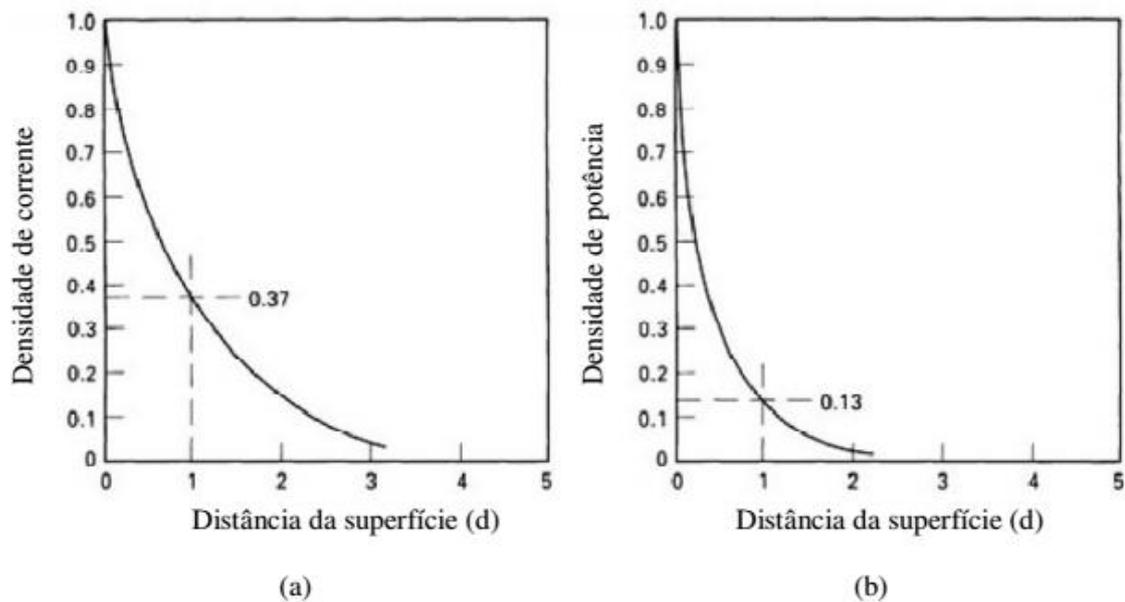


Figura 06: Densidade de corrente (a) e densidade de potência (b) em função da distância da superfície da peça de trabalho (TOTTEN,1997- adaptada BASTOS, 2009).

Para empregar aquecimento durante o processo, optou-se por utilizar uma bobina indutora a fim de alterar os ciclos térmicos do processo de SAPNC, principalmente devido as diversas funcionalidades de uma bobina indutora, tais como:

rápido aquecimento, controle de parâmetros enquanto a mesma está sendo utilizada e a facilidade da mesma poder ser empregada durante o processo de soldagem.

2.4 Têmpera e Revenimento

A têmpera é um tratamento térmico que consiste no aquecimento até a temperatura de austenitização, mantendo esta temperatura por um determinado tempo e, na sequência, aplica-se um resfriamento brusco o qual evita transformações de fase difusionais que poderiam formar estruturas bainíticas ou perlíticas, assim, ocorre a formação de uma fase metaestável denominada martensita. Existem diversos meios para realizar a têmpera, sendo os mais convencionais: água pura, ar, óleo e água com adição de sais ou polímeros. Sendo que o meio utilizado possui influência na velocidade de remoção de calor na superfície da peça (CUNHA, 2013).

Outro fator importante para o processo de têmpera, são os elementos de liga constituintes. Por exemplo, o carbono possui forte efeito sobre a dureza da estrutura martensítica, já os elementos de liga como o molibdênio retardam as transformações, fazendo com que a temperabilidade fique mais elevada (ASM, 1977). Já, aços com maior teor de elementos de liga possuem menor velocidade crítica para a formação da martensita (COLPAERT, 2008)

O processo de têmpera resulta em uma estrutura martensítica com reduzidas ductilidade e tenacidade, enquanto que o nível de tensões residuais é elevado. Assim, o emprego de materiais que possuem estas características se torna limitado em uma grande parte de aplicações industriais, fazendo com que seja necessária a correção destas propriedades através do tratamento térmico de revenimento (CUNHA, 2013).

O revenimento consiste em um tratamento térmico com o aquecimento e patamar em temperaturas inferiores à austenitização. O material é mantido por tempo suficiente para a obtenção das propriedades desejadas. Durante os primeiros minutos, o revenimento promove uma elevada queda de dureza no material, contudo, com o passar do tempo, a perda se torna pouco significativa (CUNHA, 2013).

2.5 Simulação Física

Com o conhecimento prévio das condições termomecânicas aplicadas em cada zona da junta soldada durante o processo de SAPNC e através de ensaios controlados, é possível obter microestrutura semelhante àquelas obtidas em cada região característica do processo. Assim, pode-se aprimorar o conhecimento sobre os processos termomecânicos e qual a influência destes na formação de microestruturas no material trabalhado (FONSECA, 2011).

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 Material utilizado

A simulação física e a obtenção de parâmetros de indução foram realizadas com corpos de prova provenientes do material em forma de tubo. O tubo possuía espessura de 22mm e comprimento de 300mm.

A partir de um espectrômetro de emissão óptica, obteve-se a seguinte composição química do material utilizado (Tabela 04). O espectro foi realizado no material em sua forma de chapa. E o mesmo evidenciou que o material estava com sua composição química dentro das especificações propostas pela norma ASTM A182. Este mesmo material foi utilizado para realizar o processamento pela técnica de SAPNC .

Tabela 04: Composição química em %p de peso do material analisado

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
0,13	0,50	0,013	0,019	0,24	2,20	1,08

3.2 Esquema de metodologia experimental

Para realizar a simulação física e em seguida analisar os resultados obtidos, a seguinte metodologia experimental foi empregada empregada (Figura 07):

A primeira etapa constituiu de avaliar os parâmetros da indução. Os melhores parâmetros do indutor foram utilizados para alimentar a simulação computacional, onde o ciclo térmico do indutor pode ser gerado. A simulação computacional também foi a etapa responsável por prover o ciclo térmico proveniente do processo de SAPNC. Após obter os ciclos térmicos, os mesmos foram aplicados à simulação física, durante esta etapa, um corpo de prova também foi sujeito a análise de dilatométrica. Em seguida, os corpos de prova submetidos à simulação física foram submetidos às análises de microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e microdureza Vickers. Em paralelo com a simulação física, foram realizadas análises termodinâmicas no *software ThermoCalc*.

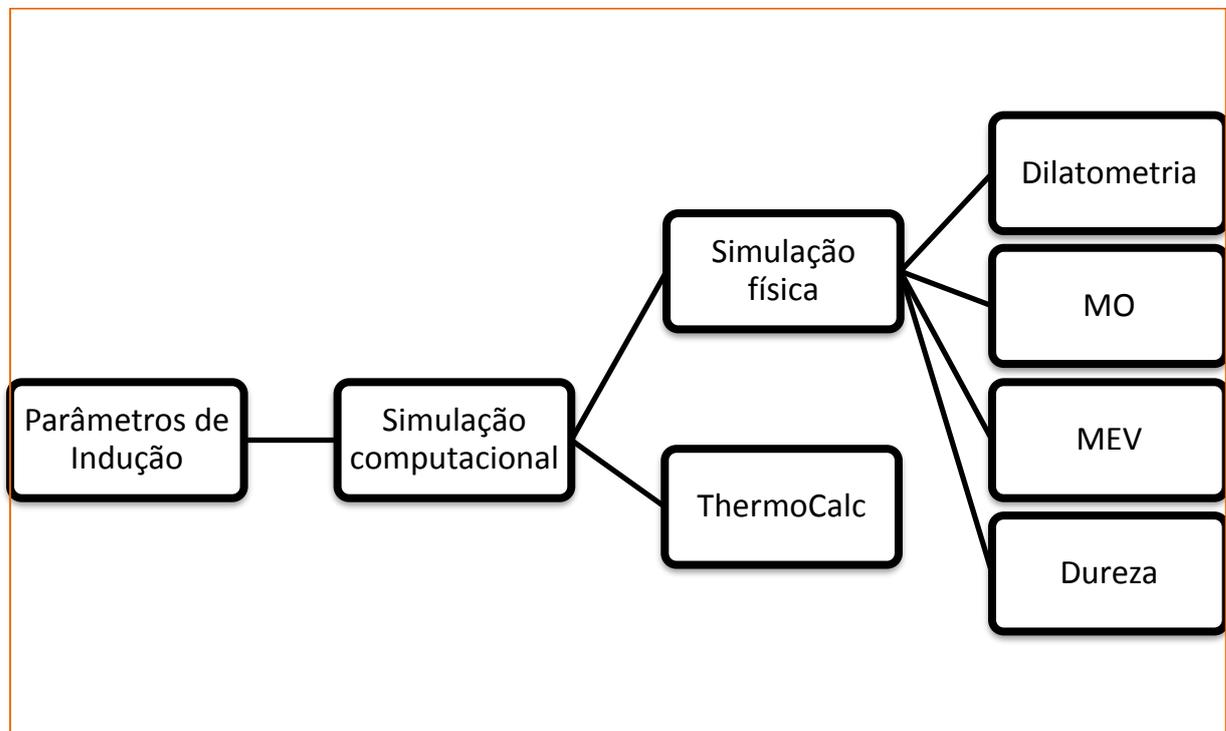


Figura 07: Desenho esquemático da metodologia experimental empregada.

3.3 Parâmetros de indução

A primeira etapa experimental teve como objetivo a obtenção dos parâmetros associados ao processo de indução. Assim, em uma chapa com 10mm

de espessura de F22, foram soldados quatro termopares a fim de monitorar o efeito da corrente elétrica aplicada na temperatura nas superfícies da chapa. Para evidenciar a perda da penetração do efeito de indução em função da espessura da chapa, foram soldados dois termopares na superfície em contato com o indutor e outros dois na superfície em contato com o bloco de apoio. Estes termopares foram acoplados em um sistema de aquisição de dados produzido pela National Instruments, o qual é capaz de fornecer a temperatura em tempo real.

Posteriormente, a chapa foi colocada sobre o efeito do indutor (Figura 08) e a mesma foi submetida ao efeito de aquecimento pelo sistema de indução. O aquecimento foi monitorado por 2 minutos. Em seguida, o aparelho de indução foi desligado e dados a respeito da temperatura de resfriamento em função do tempo foram obtidos por mais 2 minutos. Após a chapa passar sobre o processo de aquecimento e resfriamento monitorados, foi aguardado até que o resfriamento da chapa alcançasse a temperatura ambiente. Em seguida, outra corrente foi submetida à chapa. Foram testadas as correntes de 10, 15, 20, 25 e 30A respectivamente. O ensaio de 15 A foi duplicado, com o diferencial da movimentação da chapa em 50mm/min, reproduzindo o avanço da ferramenta de SAPNC. Apenas este ensaio foi duplicado desta maneira, pois com os dados obtidos com o mesmo seria possível reproduzir a influência da movimentação da chapa para as demais correntes através da simulação computacional.

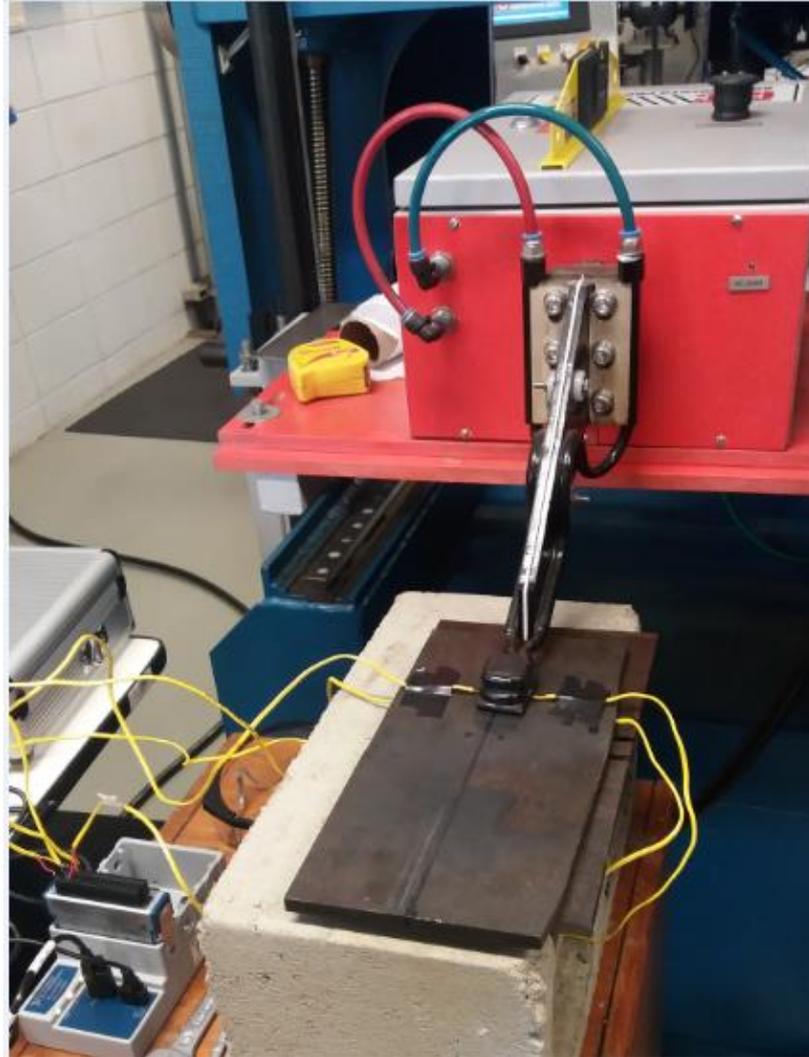


Figura 08: Montagem utilizada para obter parâmetros relacionados ao processo de indução.

Para melhor compreender o efeito da indução em relação a espessura da chapa, os termopares foram identificados, assim, termopares 0 e 2 correspondem aos fixados na superfície próxima ao indutor, já os termopares 1 e 3 são aqueles que foram acoplados na superfície oposta.

3.4 Simulação computacional

O Método de Elementos Finitos (MEF) é um modelo matemático desenvolvido para solução de problemas complexos de maneira computacional, que tem sido empregado com sucesso na estimativa de ciclos e gradientes térmicos associados à soldagem por atrito com pino não consumível. O uso dessa ferramenta permite correlacionar os ciclos térmicos com a microestrutura resultante da junta soldada. Boas estimativas de temperatura de pico e taxa de resfriamento são possíveis por meio de MEF, especialmente quando as simulações são suportadas por medidas experimentais de temperatura durante a soldagem.

A partir dos dados obtidos com o teste dos parâmetros do indutor, os mesmos foram utilizados em conjunto da simulação de SAPNC, visando descrever o comportamento da ferramenta de soldagem em conjunto com o indutor. Assim, utilizou-se o software COMSOL v5.2, onde os dados utilizados para as condições de transferência de calor são apresentados na Tabela 05.

Tabela 05: Coeficientes para as condições de transferência de calor

Condição	Valor
Resistência de contato entre o backing e o material	500 W/(m*K)
Coeficiente de convecção livre da chapa	20 W/(m ² *K)
Coeficiente de convecção no fundo do backing	3000 W/(m ² *K)
Coeficiente de convecção na lateral da ferramenta	20 W/(m ² *K)
Coeficiente de convecção no topo da ferramenta	750 W/(m ² *K)
Emissividade da superfície	0.35

A figura 09, ilustra a simulação realizada. Para a elaboração da mesma, considerou-se os parâmetros do indutor em conjunto com as condições térmicas presentes no processo de SAPNC.

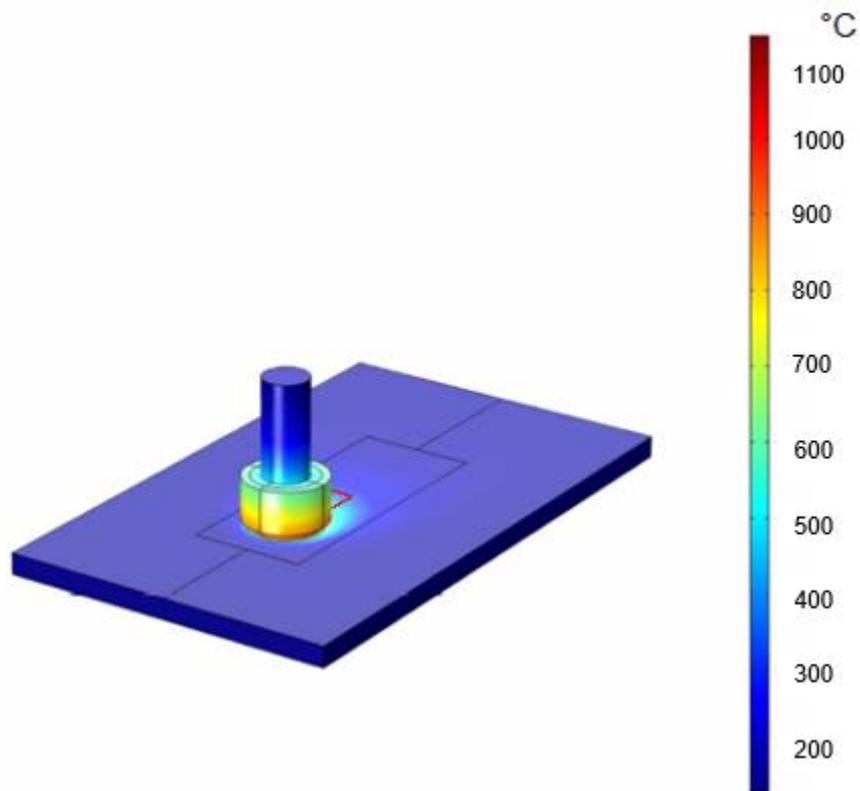


Figura 09: Simulação computacional do gradiente térmico presente no processo de SAPNC em conjunto com a ação da bobina indutora (indicada em vermelho)

3.5 Simulação física

O simulador termomecânico Gleeble 3800 (Figura 10), instalado no Laboratório Nacional de Nanotecnologia do Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais, foi utilizado para reproduzir os ciclos térmicos presentes no processo de SAPNC. Em particular, foram realizadas simulações físicas da zona misturada (ZM) presente na soldagem do aço ASTM A182 P22. Este simulador, produzido pela Dynamic Systems Inc (DSI) tem capacidade de operar com carga máxima de 10

toneladas em tração e 20 toneladas em compressão. Quando se trata do desempenho térmico, o equipamento promove o aquecimento do corpo de prova através de efeito Joule, sendo capaz de fornecer taxas de aquecimento de até 10.000 °C/s (DYNAMIC SYSTEMS INC, 2009). Este equipamento possui diferentes módulos de trabalho, abrangendo diversos processos termomecânicos industriais como laminação, forjamento, soldagem, estampagem, entre outros.

O presente trabalho, tem como enfoque estudar a influência dos ciclos térmicos presentes no processo de SAPNC e como estes influenciam na microestrutura formada. Desta maneira, os ciclos mecânicos não foram reproduzidos. As simulações físicas tiveram como objetivo reproduzir os ciclos térmicos presentes durante o processo de SAPNC e encontrar quais seriam os parâmetros de soldagem, em conjunto com o indutor, que acarretariam em uma menor dureza no material ao final do processo, preservando sua tenacidade à fratura.

A primeira etapa deste procedimento, constituiu em estudar o comportamento do material quando submetido à diferentes taxas de resfriamento após o pico da soldagem. Dessa forma, 4 corpos de prova foram aquecidos até 1100°C e em seguida foram resfriados individualmente nas taxas de 25, 50, 75 e 100 C/s.

Já, a segunda etapa teve como objetivo reproduzir o ciclo térmico ocasionado pelo tratamento de revenimento. Assim, cinco corpos de prova foram submetidos primeiramente ao ciclo térmico de uma soldagem e em seguida sofreram a ação de uma temperatura de 720°C aplicada em períodos de 01, 05, 15, 30 e 60 minutos. No ensaio de 30 minutos, foi adicionado um dilatômetro, a fim de obter o comportamento das fases do material durante o ciclo térmico. A montagem experimental desta etapa é representada na Figura 11.

Também foi simulado um corpo de prova apenas com o ciclo comum de soldagem, sem realizar o tratamento de revenimento. Foi tomado o cuidado de escolher uma temperatura abaixo da temperatura de austenitização deste material.

A última etapa consistiu de simular um corpo de prova onde o mesmo sofreu a influência do ciclo da soldagem em conjunto com o evento ocasionado pela utilização do indutor após a passagem da ferramenta de SAPNC. Este ciclo foi

obtido pela técnica de elementos finitos levando em consideração os parâmetros obtidos na avaliação da indução.



Figura 10 – Simulador termomecânica Gleeble 3800, presente no laboratório Nacional de Nanotecnologia.

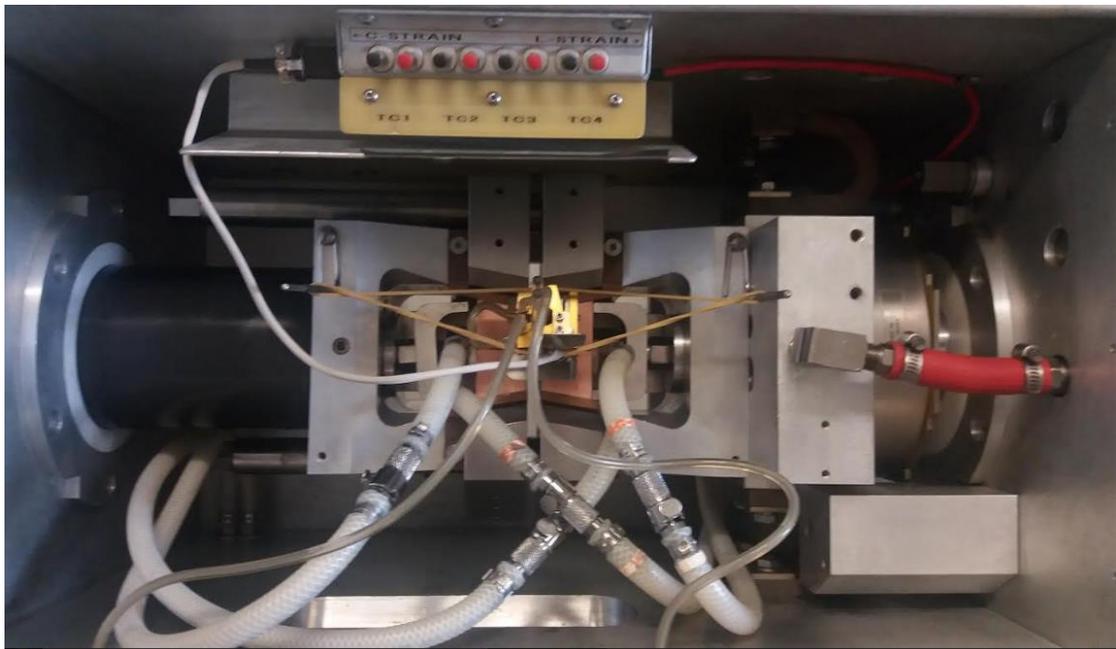


Figura 11: Esquema de montagem de corpo de prova para simulação física na Gleeble.

Para simular uma soldagem real, foi utilizado o ciclo térmico presente na Figura 12. Este ciclo foi proveniente da simulação computacional.

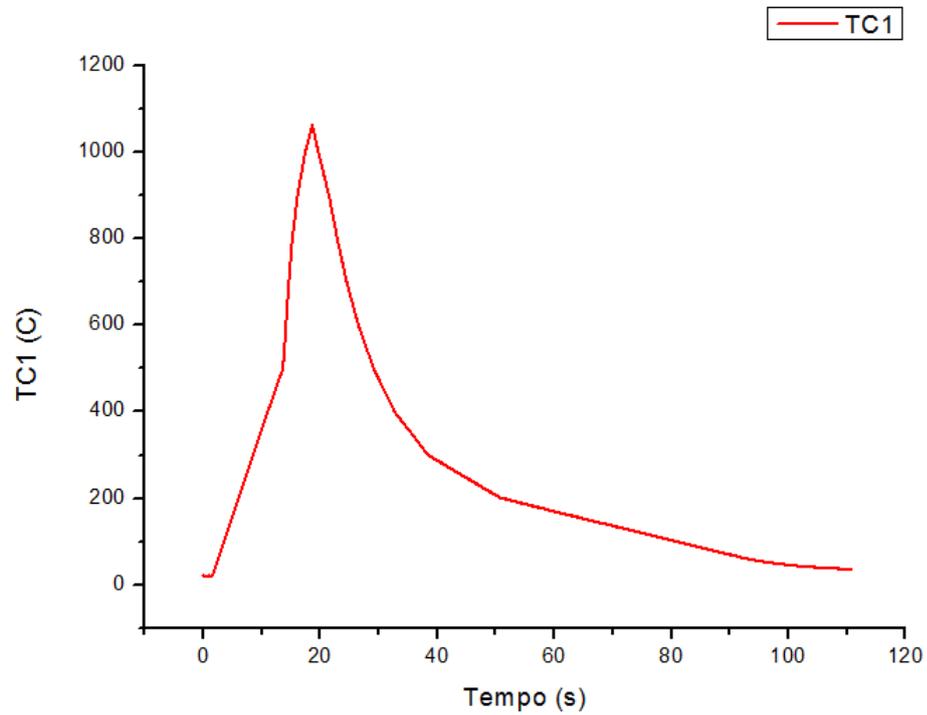


Figura 12: Ciclo térmico da soldagem que foi reproduzido na Gleeble3800.

Na Figura 13 encontra-se o ciclo térmico proveniente do maior tempo de patamar (60 minutos).

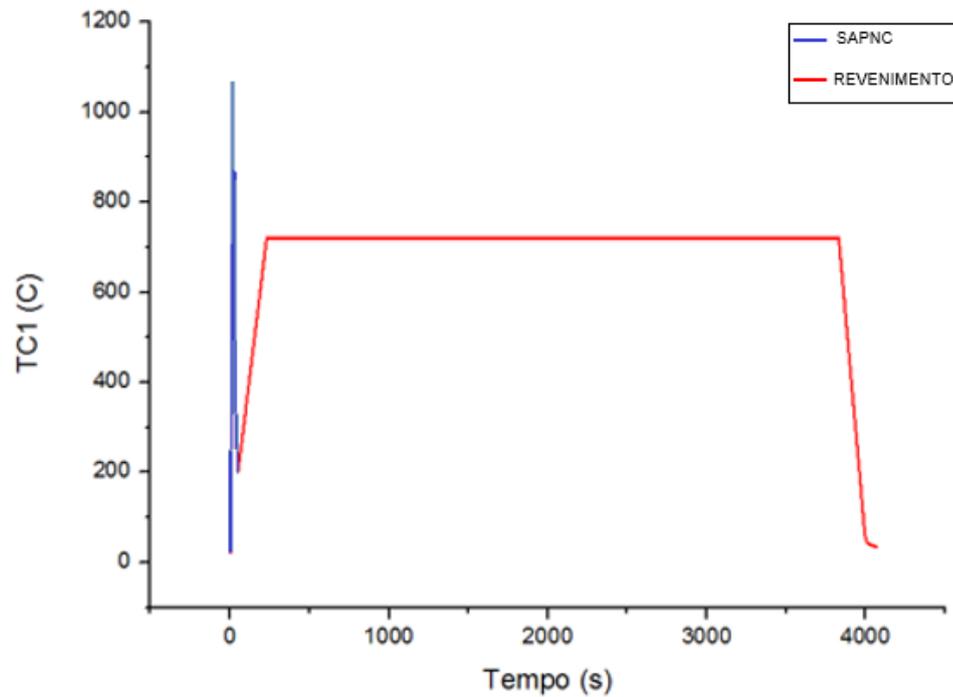


Figura 13: Ciclo térmico composto pelo processo de SAPNC em conjunto com o tratamento de revenimento. Patamar de tratamento de 60 minutos. As curvas azul e vermelha representam o ciclo térmico do processo de SAPNC e o de revenimento, respectivamente.

O ciclo térmico do indutor, utilizado para a simulação física foi proveniente da simulação computacional (Figura 14), a qual levou em consideração os parâmetros de indução obtidos experimentalmente. O mesmo foi aplicado após o ciclo térmico intrínseco ao processo de SAPNC.

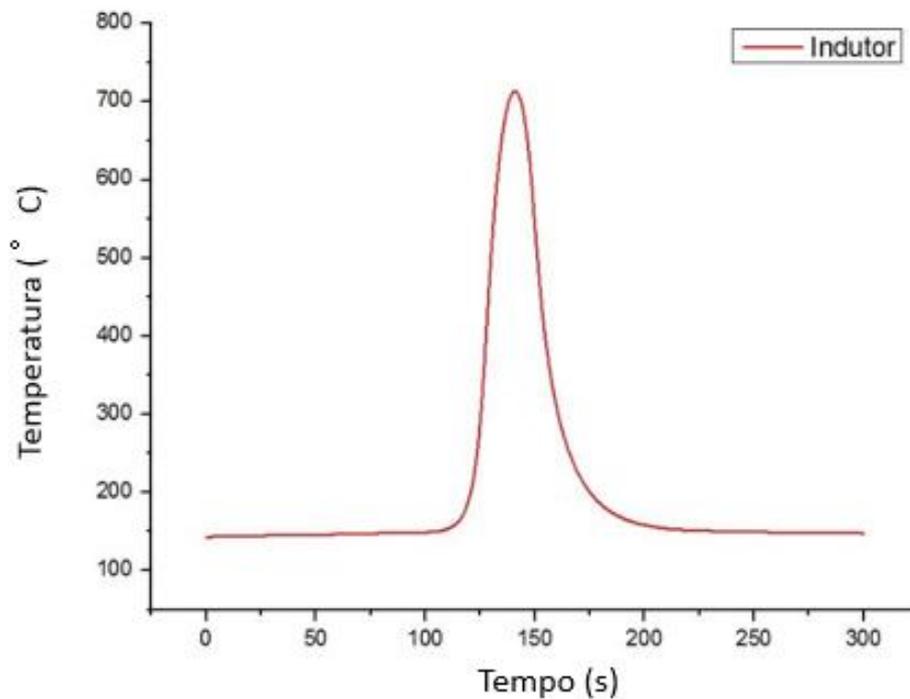


Figura 14: Ciclo térmico do indutor.

3.6 Corpo de prova

Os corpos de prova utilizados foram usinados a partir de tubos do aço ASTM A182 P22 com espessura de 22mm. Os mesmos foram formulados de maneira a permitir ao escoamento de fluido pelo interior dos mesmos, ocasionando resfriamento interno (Figura 09). O desenho técnico completo do corpo de prova se encontra no Anexo A. Para acompanhar a temperatura durante os ensaios, termopares do tipo K (Alumel / Cromel) foram fixados no meio do comprimento dos corpos de prova.

3.7 Caracterização microestrutural

Para a preparação metalográfica, amostras extraídas da seção transversal dos corpos de prova submetidos a simulação física foram embutidas em baquelite. Durante o lixamento, foram utilizadas lixas de granulometria 400 e 600. Seguido de polimento em suspensões de diamante de 3 μm e 1 μm . Também foi utilizada suspensão de Silica para prover o melhor acabamento do corpo de prova. Foram utilizados microscópio óptico Zeiss Axio Z1m e o microscópio eletrônico de varredura FEI Quanta 650FEG. A microestrutura foi revelada a partir do ataque por imersão com o reagente Nital 2% (2ml HNO_3 + 98ml Álcool Etílico). As amostras foram imersas entre 25 à 60 segundos.

3.8 Microdureza

Após os corpos de prova passarem pela caracterização microestrutural, os mesmos foram submetidos a ensaios de microdureza Vickers em microduromêtro LECO, na qual o valor médio foi estabelecido a partir de 20 indentações, espaçadas cada 200 μm , foram obtidas por meio da aplicação de uma carga de 200g por 15s.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Material processado

O material processado e suas respectivas análises de microscopia óptica e de microdureza já se encontravam concluídos pelo grupo de Caracterização e Processamento de Metais do Laboratório Nacional de Nanotecnologia. Estas análises foram cedidas pelo grupo para elaboração deste trabalho. Os dados do material processado tiveram como intuito orientar e complementar os resultados da simulação física.

4.1.1 Parâmetros de processamento

A fim de obter informações das consequências do processo de SAPNC em parâmetros como dureza e microestrutura, foi realizado o processamento de chapas do material F22. O cordão de solda foi processado com velocidade de rotação de 200 rpm, velocidade de avanço de 100mm/min e força no eixo Z de 20kN. A figura 15 revela a característica do cordão soldado, já a Figura 16 revela a macrografia do mesmo. Nota-se que o cordão de solda apresentou aspecto retilíneo e uniforme, sem aparente formação de rebarbas. Ainda, pela temperatura do processo, observa-se a existência de oxidação superficial de cor azulada.

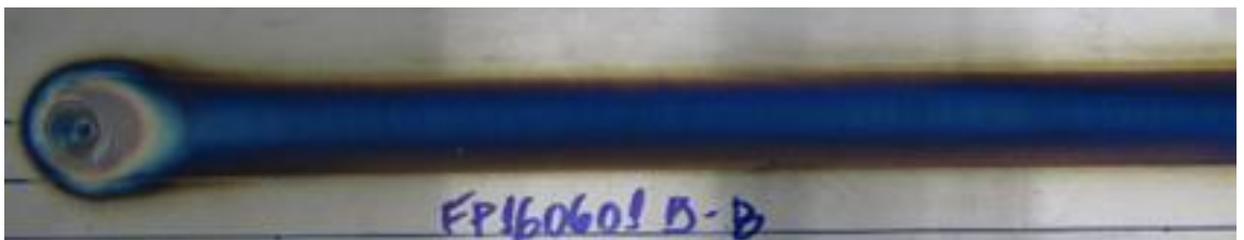


Figura 15: Cordão obtido em processamento realizado com velocidade de rotação de 200 rpm, velocidade de avanço de 100mm/min e força em Z de 20kN.

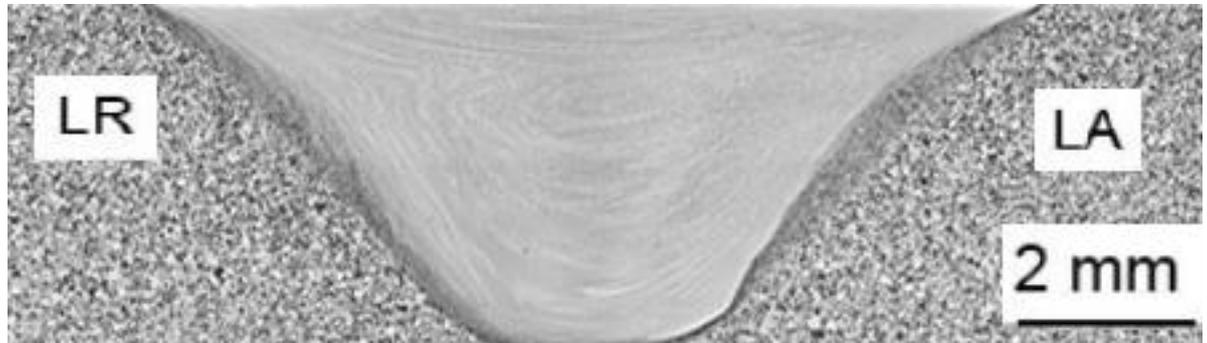


Figura 16: Macrografia de cordão de solda processado com velocidade de rotação de 200 rpm, velocidade de avanço 100mm/min e força axial de 20kN.

A macrografia da sessão transversal do cordão de solta apresenta a existência de suas regiões bem distintas: a mais clara (região da mistura) e a mais escura (formada principalmente pelo metal de base). Outro fator de relevância observado é a raíz do cordão, onde percebe-se que os parâmetros de soldagem aplicados ocasionaram a raíz a preencher totalmente a chapa.

4.1.2 Microscopia Óptica

A microscopia óptica do material processado revelou microestrutura (Figura 17) martensítica.

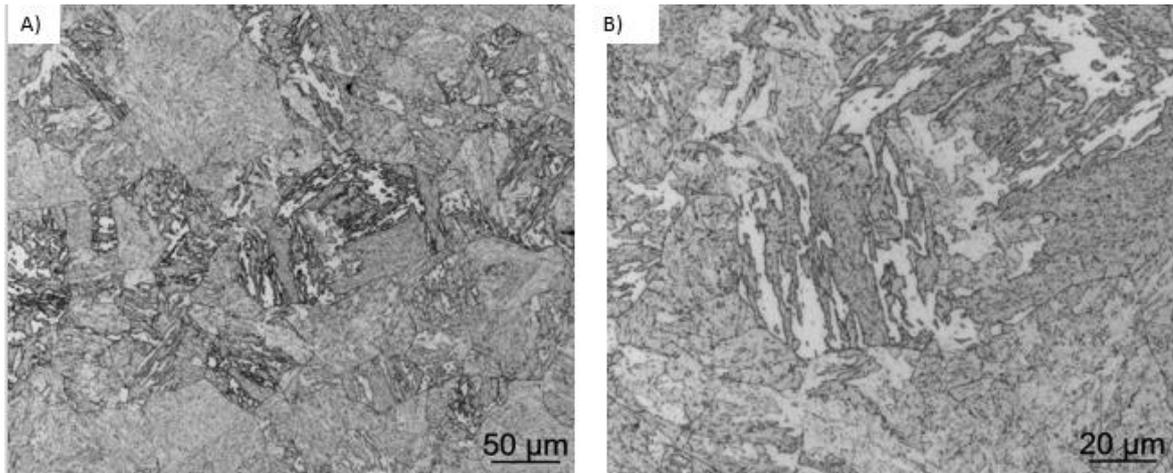


Figura 17: Microestrutura do material processado (A) Aumento de 200x. (B) Aumento de 500x. Ataque Nital 2%.

4.1.3 Microdureza

A abordagem seguinte foi analisar a dureza do cordão processado. Desta forma, foi analisada uma linha de dureza criada na superfície do corpo de prova. Quando se considera todo o comprimento da linha de dureza, tem-se que a amostra analisada obteve uma dureza média de 334 HV.

Como observado na figura 18, tem-se que a dureza tem um elevado aumento quando está no intervalo de distância de 7500 à 20000 μm , chegando na média de 449 HV. Este intervalo em questão, corresponde a zona misturada do cordão de solda analisado. Provavelmente, o elevado aumento de dureza observado na região ZM, deve-se a diminuição no tamanho de grão ocasionada pelo processo de deformação seguido de recristalização. Ainda, pode-se acrescentar a existência de martensita/bainita oriunda do processo de resfriamento.

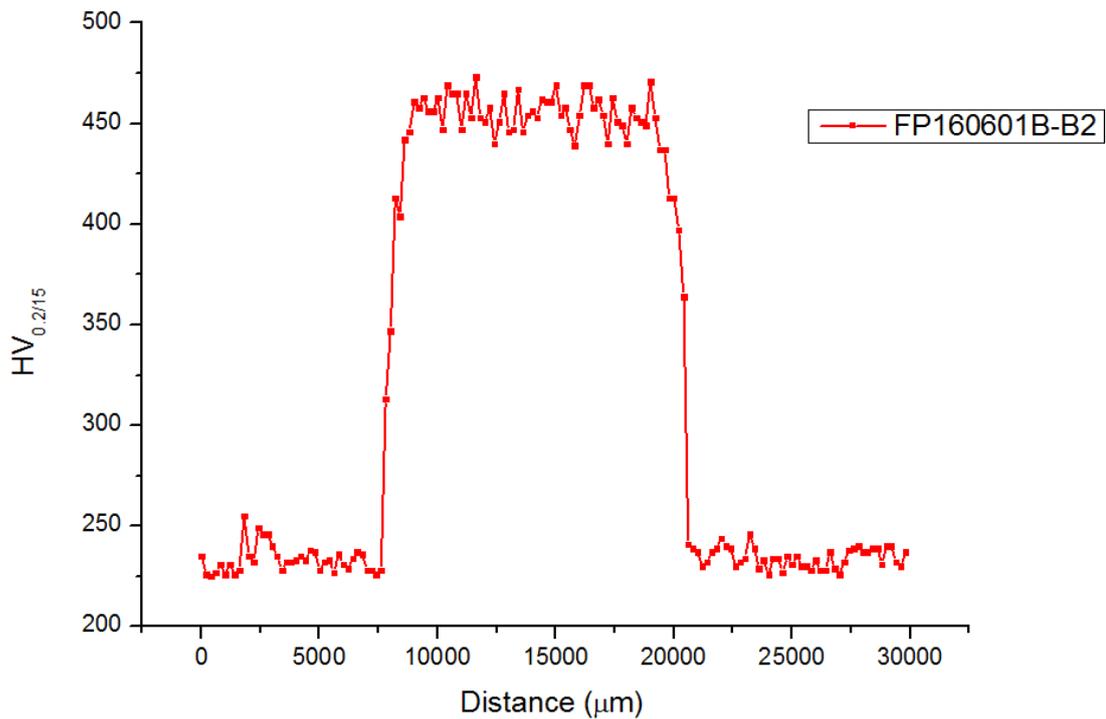


Figura 18: Linha de dureza de um cordão de solda processado com velocidade de rotação de 200 rpm, velocidade de avanço 100mm/min e força em Z de 20kN.

4.2 Simulação física

4.2.1 Parâmetros de indução

A partir dos dados obtidos experimentalmente na avaliação dos parâmetros do indutor, ficou evidente a partir de gráficos gerados na Figura 19 que o efeito da indução foi decaindo em função da espessura, desta forma, a superfície próxima ao indutor alcançou temperaturas mais elevadas que a superfície oposta. Ademais, quando o ensaio de 30A foi realizado, o termopar 1 fragilizou e perdeu o contato, assim, a aquisição de dados deste termopar foi interrompida. A partir da investigação dos parâmetros de indução, escolheu-se trabalhar com a bobina indutora na corrente de 25 A, visto que esta corrente foi capaz de fornecer temperaturas elevadas (próximas à 900°C) sem fragilizar os termopares.

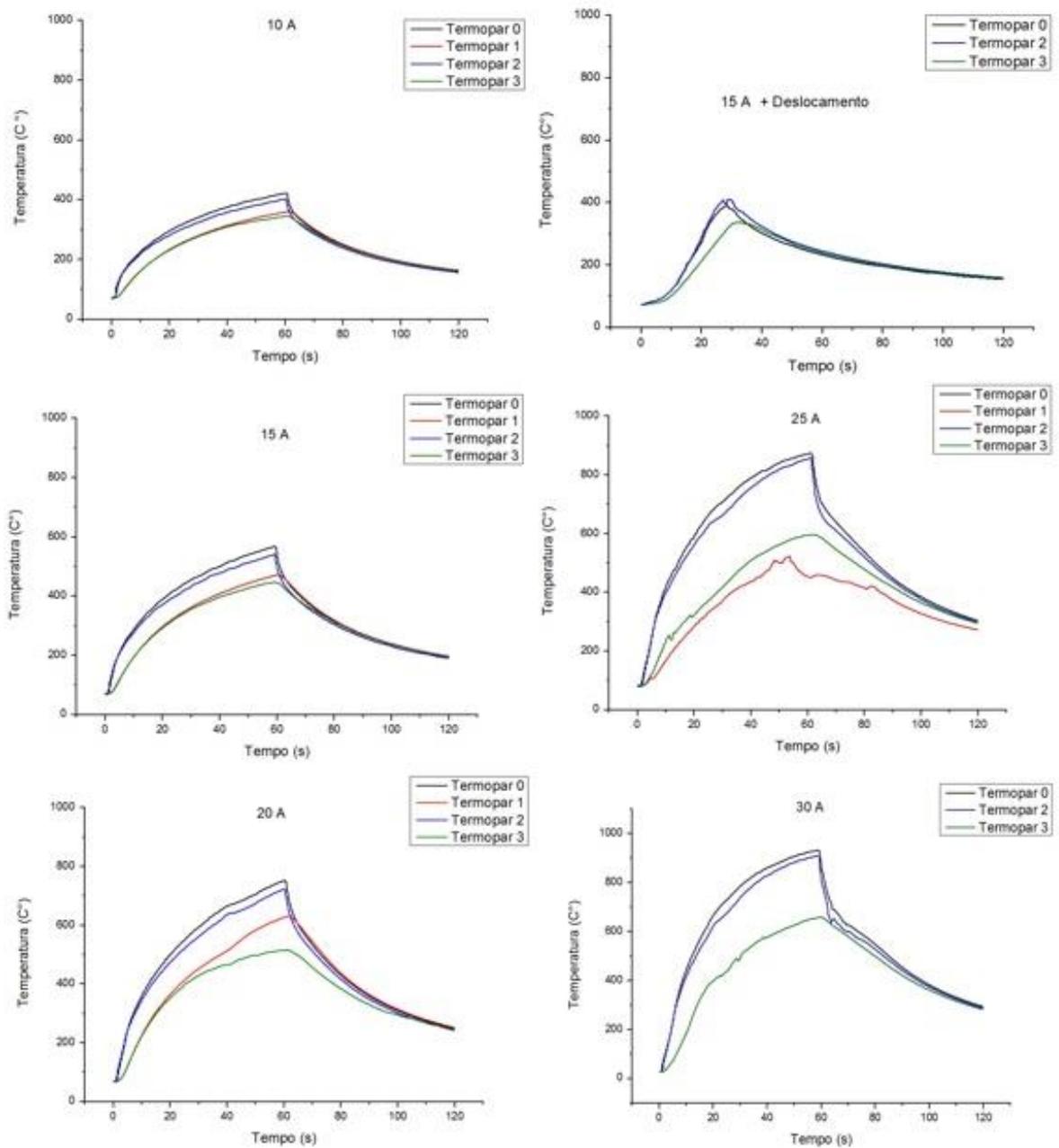


Figura 19: Gráficos evidenciando a relação entre a corrente utilizada pelo indutor e as temperaturas obtidas durante o processo de aquecimento e resfriamento da chapa. Ensaios realizados em correntes de 10, 15, 20, 25, 30 A, sendo que o ensaio de 15A foi duplicado com a chapa em movimento.

4.2.2 ThermoCalc

Com a finalidade de auxiliar a identificar o comportamento da microestrutura do material após sofrer o processo de revenimento e ajudar nas investigações de microscopia, utilizou-se do software ThermoCalc (2016 a) em

conjunto com a composição química estudado. Assim, foi possível construir uma estimativa termodinâmica para as porcentagens de fases existentes no material com o processo de SAPNC (Figura 20). No programa, definiu-se o intervalo de trabalho de temperaturas entre 400 e 1200 °C, e a porcentagem de massa sendo calculada até 100%. A partir do gráfico obtido, nota-se que no equilíbrio termodinâmico são encontradas quatro fases no intervalo de temperatura estipulado: Ferrita (BCC A2), Austenita (FCC A1), precipitados $M_{23}C_6$ e M_6C .

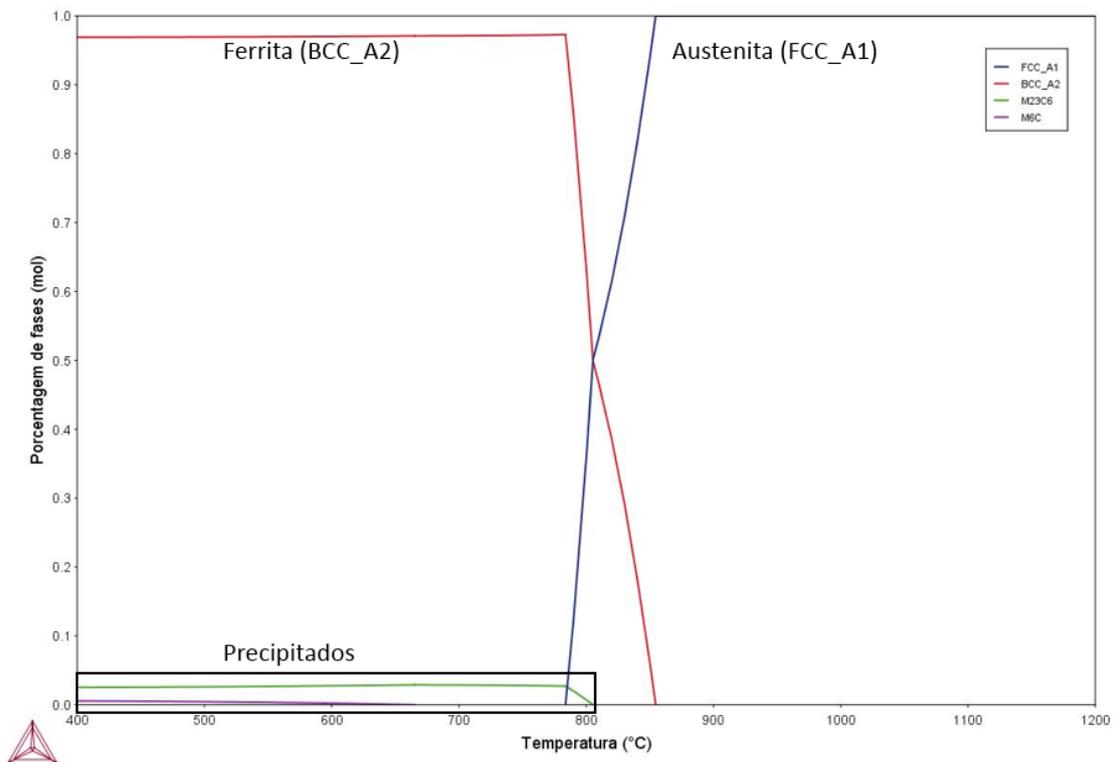


Figura 20: Estimativa da porcentagem de fases presentes no processo de SAPNC

Para melhor compreender as fases provenientes dos precipitados encontrados, foi realizada uma análise termodinâmica referente à porcentagem mássica dos elementos presentes na fase $M_{23}C_6$ (Figura 21) em função da temperatura. Não foi realizada a análise apenas da fase M_6C pois a mesma não se encontra mais presente na temperatura em que o revenimento foi realizado (720°C).

Com esta análise, é possível ter um melhor direcionamento a respeito dos elementos que estão presentes no precipitado, sendo que os mesmos são: carbono, cromo, ferro, mangânes, molibdenio e silício.

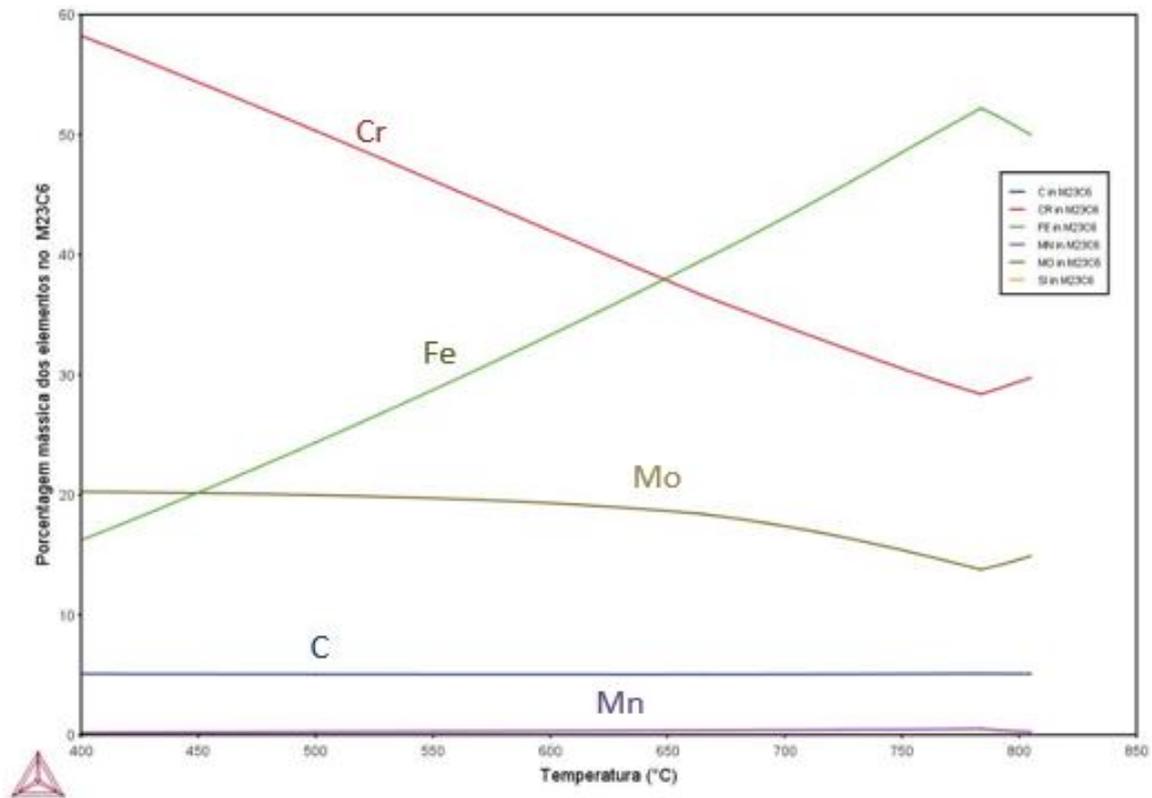


Figura 21: Porcentagem mássica dos elementos presentes no precipitado M23C6.

4.2.3 Dilatometria

A partir das medidas de dilatometria obtidas durante o ensaio de ciclo de soldagem em conjunto com o revenimento de 30 minutos (Figura 22), foi possível encontrar os valores para o início e fim da transformação austenítica (AC1) e (AC3), respectivamente. Também foi encontrado o início da transformação martensítica (Ms).

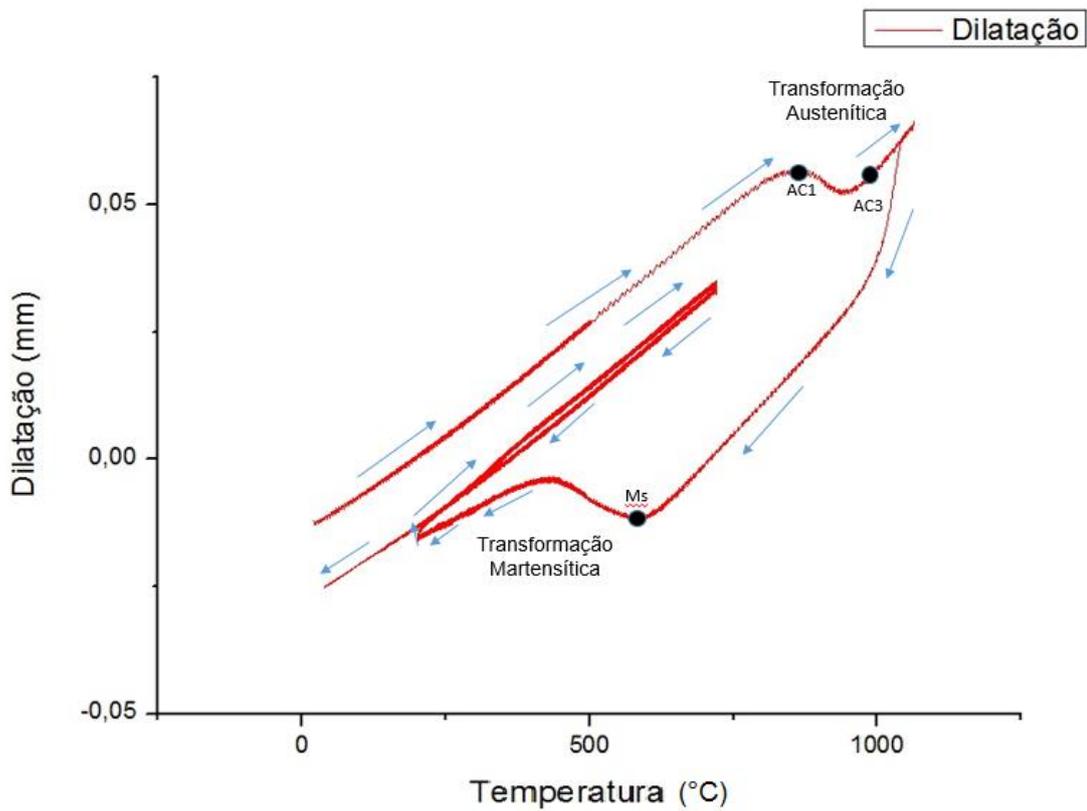


Figura 22: Dilatometria obtida pelo ciclo térmico de SAPNC em conjunto com um revenimento de 30 minutos. As setas em azul representam a orientação das medidas do dilatômetro.

Foi separado o ciclo térmico relacionado apenas ao revenimento, a fim de estudar o comportamento do dilatômetro no tratamento de 30 minutos (Figura 23). Observa-se que o corpo de prova expandiu com o aumento da temperatura e em seguida se manteve constante. Este patamar significa que houve alívio das tensões residuais provenientes da fase metaestável martensítica. O início do alívio de tensões começa a acontecer no tempo de 225 segundos.

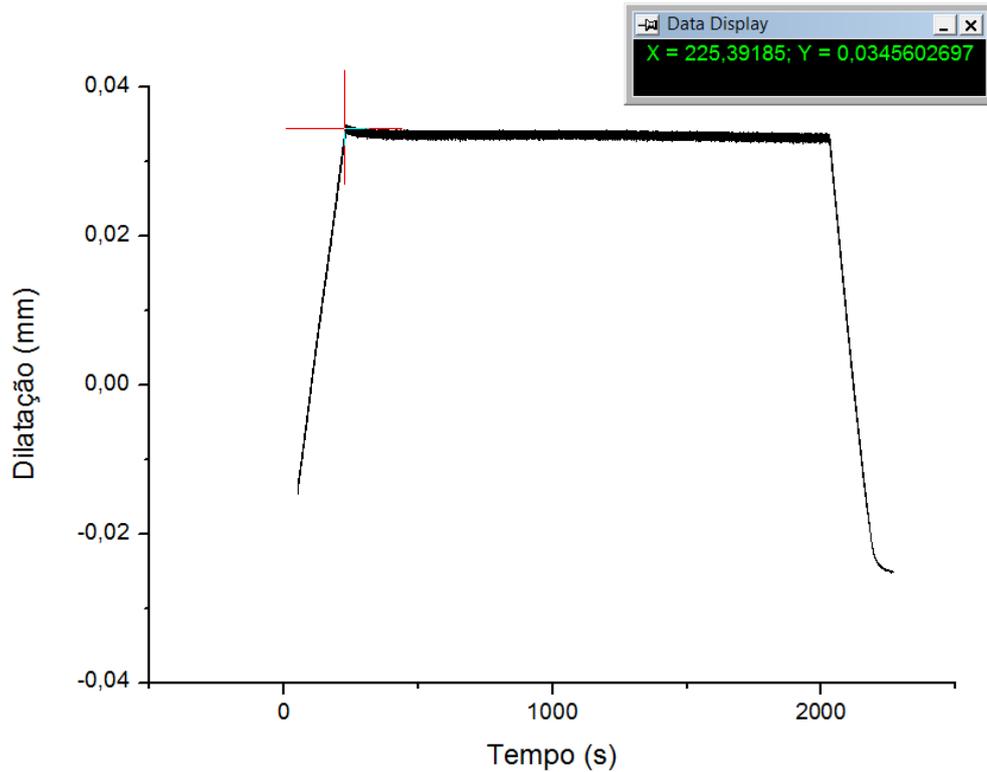


Figura 23: Dilatação em função do tempo no ciclo térmico do revenimento. Em evidência há o ponto em que o relaxamento da amostra, com suas respectivas coordenadas de tempo e dilatação evidenciadas no Data Display.

Ressalta-se que desde o aquecimento, o revenimento começa a agir sobre as tensões presentes no material.

4.2.4 Microscopia Óptica

As imagens correspondentes a microscopia óptica da primeira etapa da simulação física estão representadas na Figura 24. As mesmas foram obtidas na região média do comprimento útil do corpo de prova, próxima a região em que o termopar estava alocado.

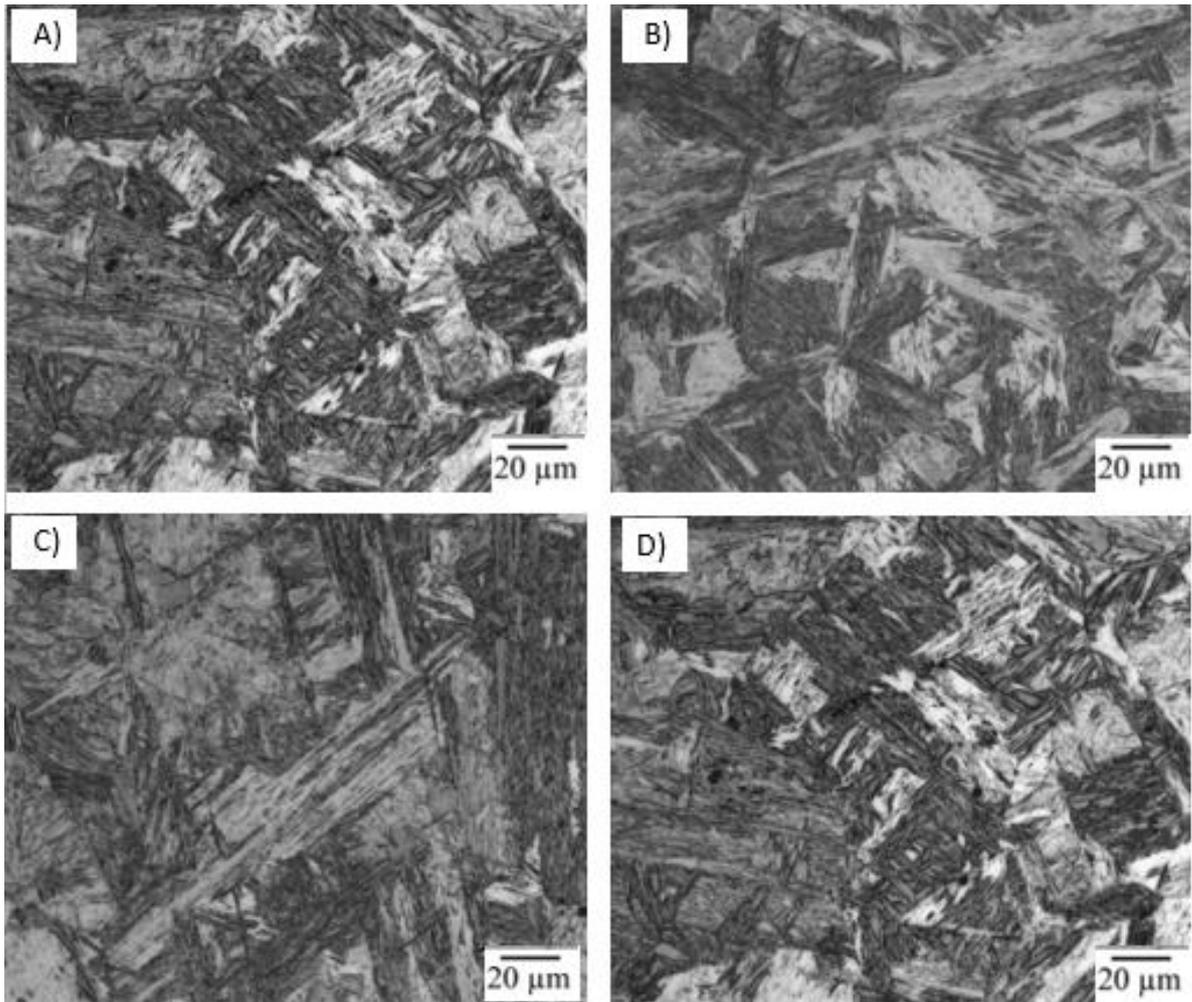


Figura 24: Microscopia óptica do aço resfriado em diferentes taxas de resfriamento (a) 25 °C/s, (b) 50 °C/s, (c) 75 °C/s e (d) 100 °C/s. Ataque Nital 2%.

As imagens de microscopia óptica forneceram estruturas tipicamente martensíticas em todos os corpos de prova, comprovando que apesar das diferentes taxas de resfriamento, a transformação martensítica ocorre. Desta forma, para este aço, a mesma será presente após o processo de soldagem por atrito de pino não consumível, mesmo que os parâmetros de processamento sejam ajustados para reduzir a taxa de resfriamento. Valores factíveis para taxas de resfriamento após o processo de SAPNC estão acima de 25 °C/s.

Já, na segunda etapa da simulação física, os corpos de prova foram submetidos aos tempos de 1, 5, 15, 30 e 60 minutos de revenimento na temperatura de 720°C. Também foi avaliada uma amostra que não passou pelo tratamento de

revenimento, apenas pelo ciclo térmico da soldagem. As imagens (Figura 25) foram obtidas na região média do comprimento útil do corpo de prova, próxima a região em que o termopar estava alocado.

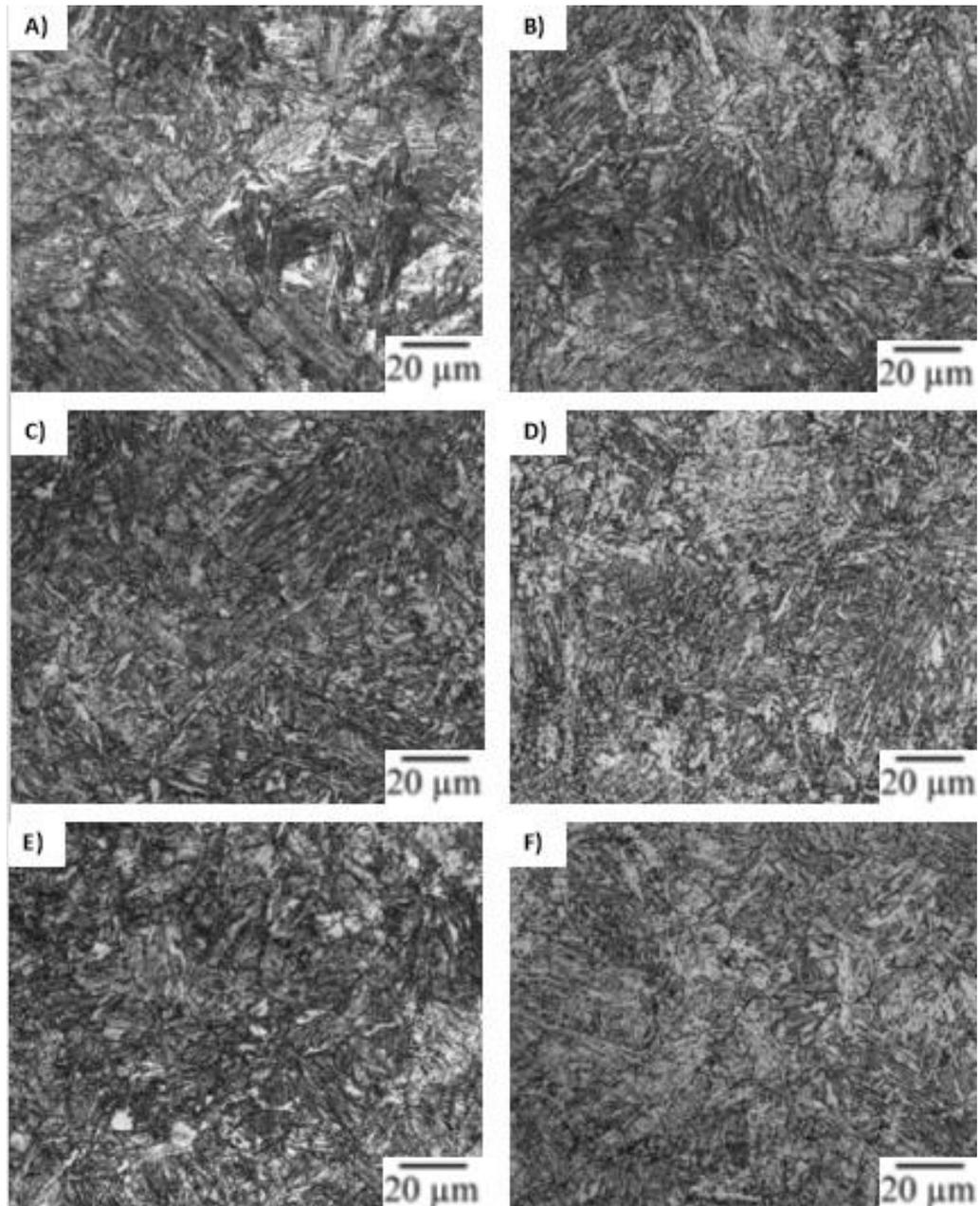


Figura 25: Microscopia óptica do aço submetido a diferentes tempos de revenimento (a) 0 min (Sem revenimento), (b) 1 min, (c) 5 min, (d) 15 min, (e) 30 min e (f) 60 min. Ataque Nital 2%.

A partir da microscopia óptica, nota-se que os corpos de prova que sofreram revenimento começaram a ter sua microestrutura modificada quando comparadas com a amostra que não sofreu o tratamento (a). O revenimento proporcionou microestruturas onde a martensita foi transformada para martensita revenida.

Em seguida, foi analisado o corpo de prova que foi sofreu ao ciclo da soldagem e posteriormente foi submetido ao indutor (terceira etapa). Neste CP, encontra-se uma microestrutura onde há presença de precipitados, contudo em menor quantidade que os corpos de prova que sofreram revenimento por um tempo mais longo (Figura 26). Assim, ainda há a presença de martensita, contudo a mesma já apresenta o início de sua transformação para revenida. Desta maneira, o material trabalhado se torna mais resistência, visto que sua fragilidade diminui com o alívio das tensões residuais provenientes da transformação martensítica. Assim, o material se torna apto para aplicações industriais.

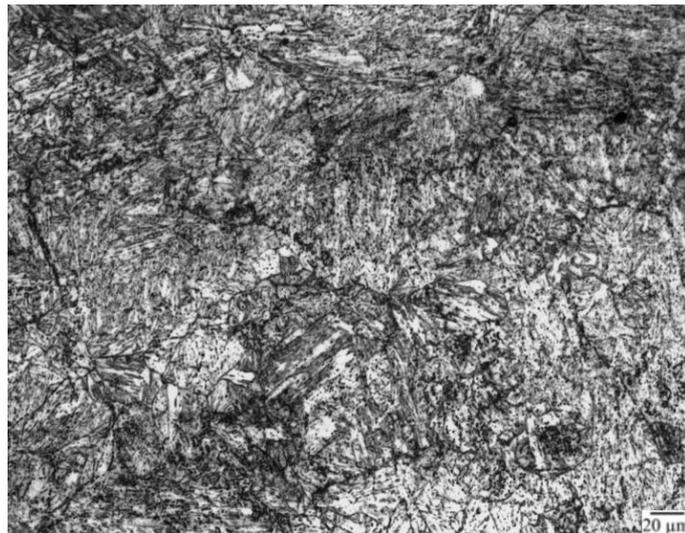


Figura 26: Microestrutura do corpo de prova que sofreu processo de SAPNC em conjunto com o revenimento provido pela bobina indutora. Ataque Nital 2%.

4.2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Visando estudar com maiores detalhes a microestrutura dos corpos de prova, foi realizada a análise em microscopia eletrônica de varredura. Foram avaliados os corpos de prova submetidos a 1, 5 e 15 minutos de revenimento, figuras 29, 30 e 31, respectivamente. A amostra que não sofreu o tratamento também foi observada nesta técnica (Figura 27).

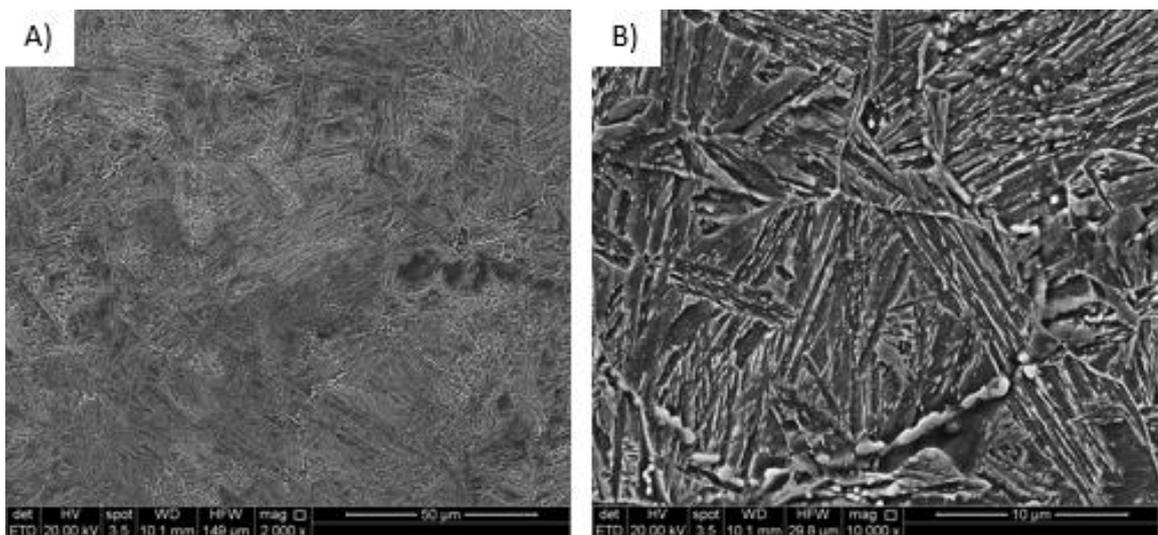


Figura 27: Corpo de prova que apenas sofreu a tempera intrínseca ao processo de SAPNC, sem sofrer posterior revenimento. A) Aumento de 2000x. B) Aumento de 10000x. Ataque Nital 2%

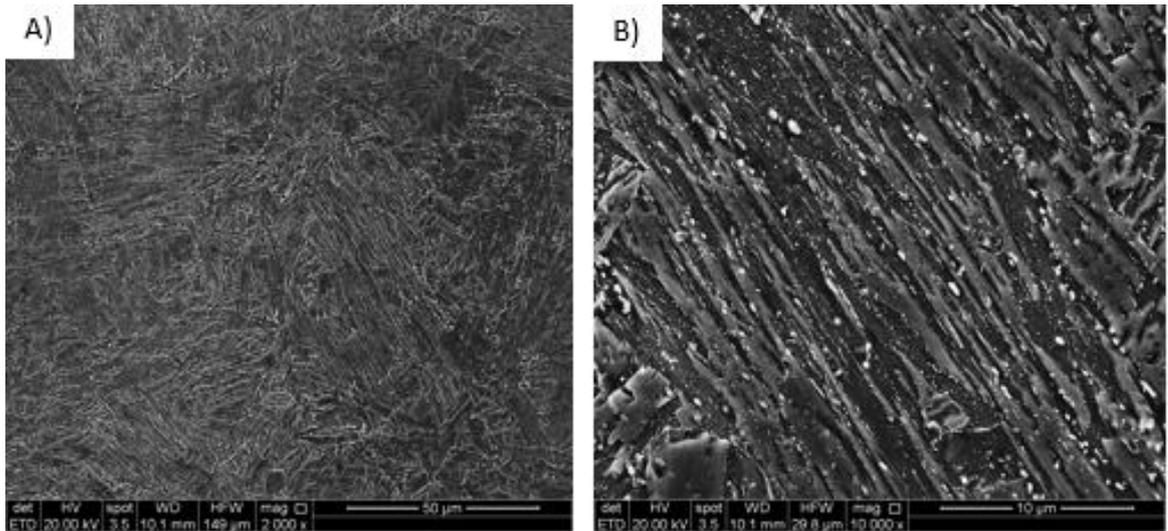


Figura 28: Corpo de prova que após o processo de SAPNC passou por revenimento por 1 minuto. A) Aumento de 2000x. B) Aumento de 10000x. Ataque Nital 2%

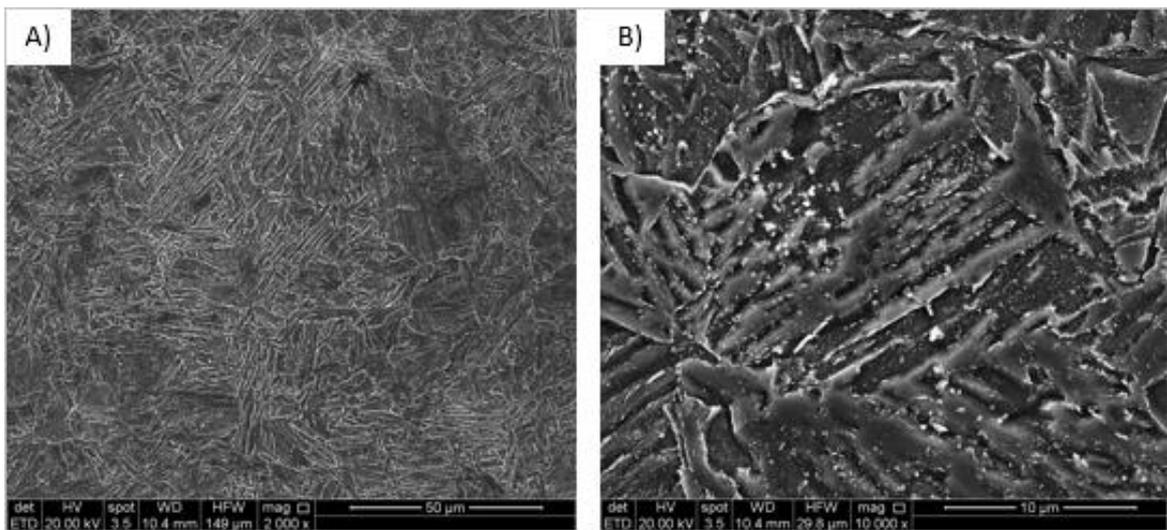


Figura 29: Corpo de prova que após o processo de SAPNC passou por revenimento por 5 minutos. A) Aumento de 2000x. B) Aumento de 10000x. Ataque Nital 2%

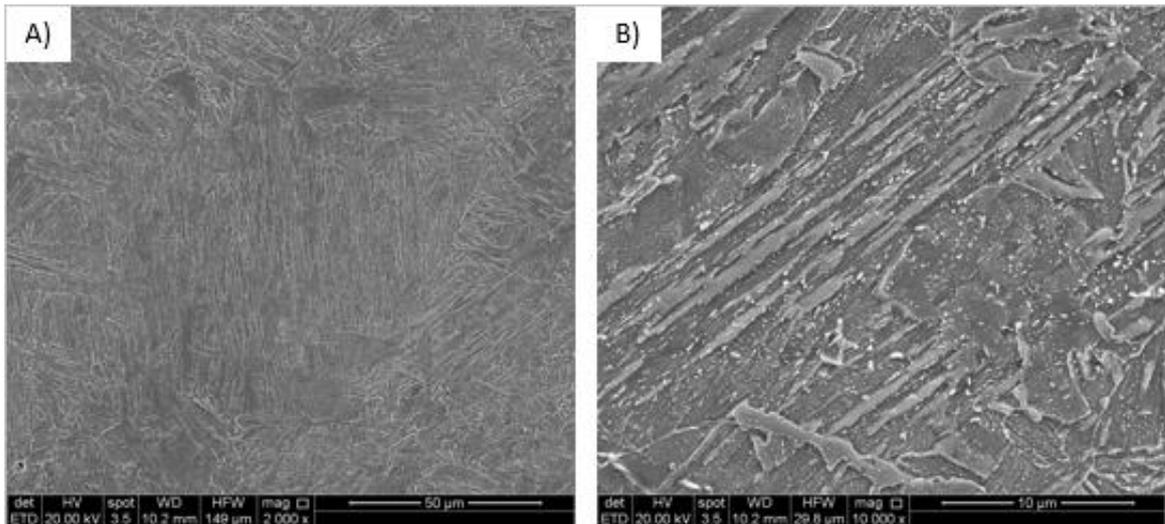


Figura 30: Corpo de prova que após o processo de SAPNC passou por revenimento por 15 minutos. A) Aumento de 2000x. B) Aumento de 10000x. Ataque Nital 2%

A partir das micrografias obtidas, nota-se que com o aumento do tempo de revenimento, mais precipitados surgem sobre a matriz martensítica. Além disso, observa-se que para tempos longos de tratamento as ripas de martensita começam a perder suas formas retas, passando a ter uma morfologia mais irregular, característica de martensita revenida.

4.2.6 Microdureza Vickers

Após avaliar os *outliers* dos valores obtidos nas indentações da primeira etapa dos corpos de prova da simulação física, as seguintes médias foram obtidas em função da taxa de resfriamento (Figura 32):

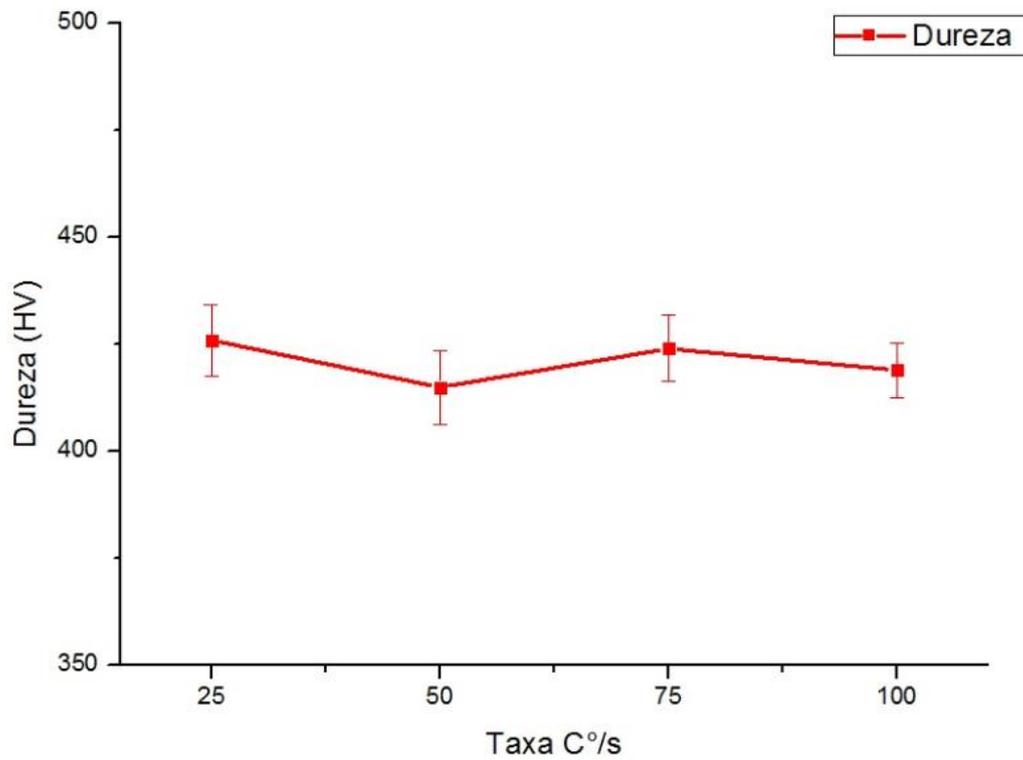


Figura 31: Dureza do material em função das taxas de resfriamento de 25, 50, 75 e 100 °C/s

Com os valores obtidos, nota-se que as diferentes taxas de resfriamento não afetaram a dureza do material e a mesma encontra-se bastante próxima do valor registrado na zona misturada do processo de SAPNC, de 449HV.

Já, após tratar os dados obtidos no ensaio de dureza relacionado aos corpos de prova da segunda etapa da simulação física, foi calculada a média e o desvio padrão de cada CP. A figura 33 apresenta esses resultados para tempos de revenimento entre 0 e 60 minutos.

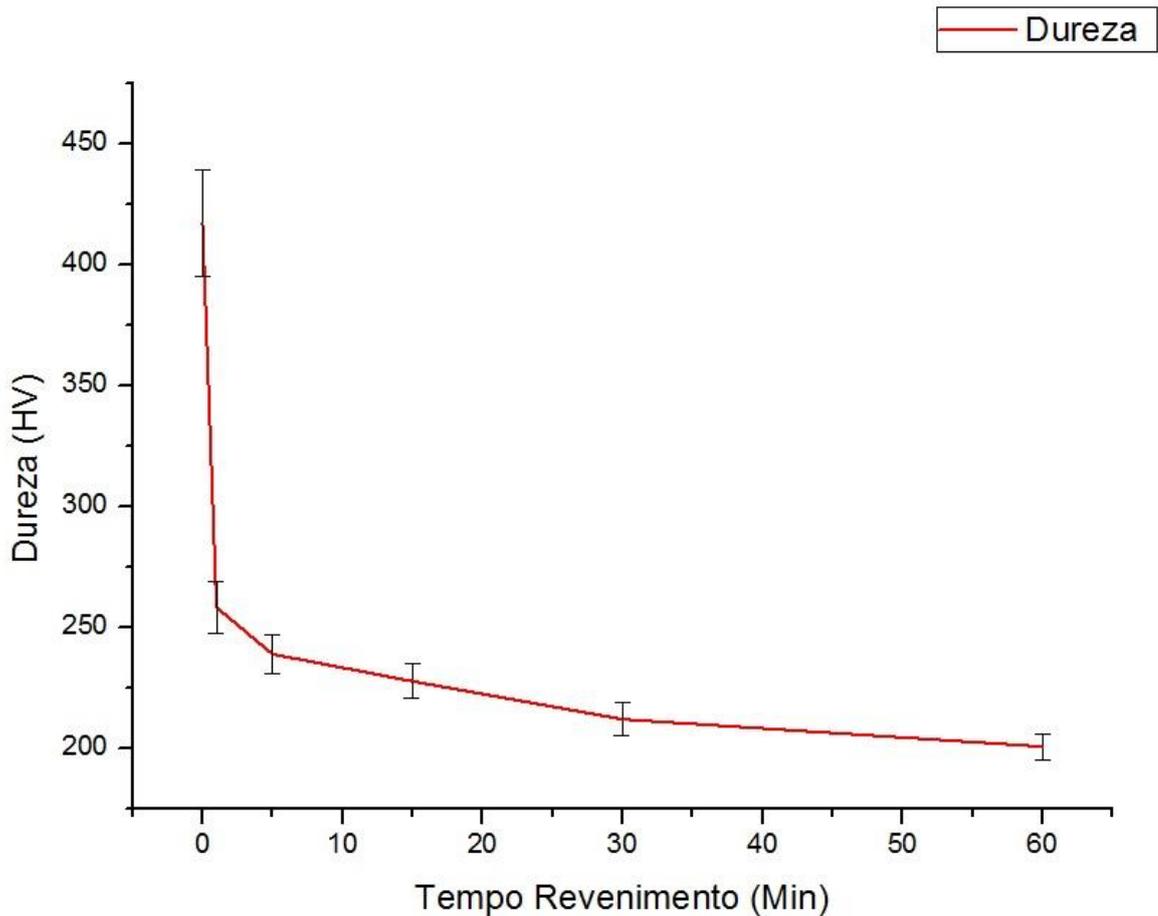


Figura 32: Média das durezas obtidas nos corpos de prova relacionados ao revenimento nos tempos de 0 (sem revenimento, apenas com o processo natural de SAPNC), 01, 05, 15, 30 e 60 minutos.

Com a análise da dureza, nota-se-se o corpo de prova que submetido a simulação física sem revenimento teve valor próximo (423 HV) ao obtido pelo processamento do material pela técnica de SAPNC (449HV). Também observa-se que houve uma elevada redução de dureza quando se compara o corpo de prova (CP) que não passou pelo tratamento (423 HV), com o CP que esteve submetido a 1 minuto de revenimento, correspondente à 260 HV. Assim, durante 1 minuto, ocorreu uma redução de dureza em aproximadamente 39% do valor inicial, este valor comprova que apesar do tempo utilizado no patamar de revenimento não ser o suficiente para o material ter o alívio completo das tensões residuais (225 s segundo a medida de dilatométrica), o tempo de 1 minuto já tem ação sobre as mesmas. Também pode-se

observar que a dureza foi reduzida com o aumento do tempo de revenimento contudo, as novas durezas não tiveram valores muito inferiores à dureza referente ao primeiro minuto de tratamento. O revenimento aplicado durante 60 minutos foi capaz de reduzir a dureza em aproximadamente 48% quando comparado com o material que sofreu apenas a tempera intrínseca ao processo de SAPNC.

Já para a terceira etapa, tem-se que a média dos valores de microdureza Vickers nas indentações é de 317 HV. Logo, o revenimento proveniente apenas pela passagem do indutor após o processo de SAPNC foi capaz de reduzir 30% da dureza do material quando comparado com o material que só sofreu ciclo térmico da técnica de SAPNC. Sendo assim, as condições impostas, afim de reduzir os efeitos nocivos da martensita, foram adequadas e projetam condições ideais para aplicação do indutor durante a soldagem

Foi elaborado um comparativo (Figura 34) para melhor enunciar como o processo de revenimento (aplicado durante o patamar de 1 minuto) e o indutor foram eficazes em reduzir a dureza do material processado pela técnica de SAPNC.

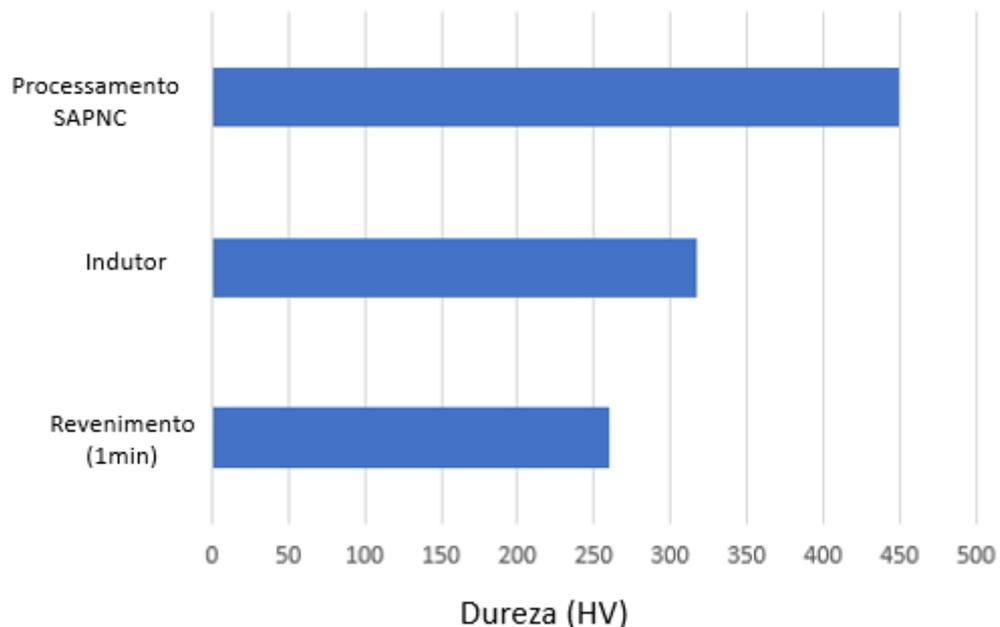


Figura 33: Comparativo entre a a influência do indutor e do revenimento por 1 minuto na redução da dureza do processo.

5 CONCLUSÃO

A partir das análises de dureza realizadas, nota-se que as diferentes taxas de resfriamento a partir do campo austenítico não tiveram significativo impacto na redução dos valores de dureza obtidos no material após o processo de soldagem por atrito de pino não consumível. Desta forma, conclui-se que acoplar um indutor juntamente com a ferramenta de SAPNC, com a finalidade de apenas reduzir a taxa de resfriamento, não iria auxiliar no objetivo do trabalho. Com a microscopia óptica, é possível reafirmar que a dureza não obteve menores valores, visto que, independente da taxa de resfriamento, a estrutura permaneceu predominante martensítica.

Com as análises metalográficas dos corpos de prova que passaram pelo processo de revenimento proveniente da bobina de indução, percebeu-se que pequenos tempos de tratamento foram suficientes para causar uma elevada queda na dureza do material para uma temperatura de revenimento de 720 °C. Contudo, quando foi simulado um ciclo do indutor à mesma velocidade do processo de soldagem, tem-se que apesar do ciclo simulado não ter um tempo de aquecimento suficiente para prover o total alívio das tensões, o mesmo foi eficiente para reduzir a dureza para valores significativos, tornando o material apto para aplicações que antes o mesmo era inapropriado.

Dessa maneira, conclui-se que o indutor pode ser utilizado como uma ferramenta de tratamento térmico pós-soldagem para revenimento da microestrutura predominantemente martensítica oriunda de SAPNC. No entanto, estudos adicionais são necessários para determinar a temperatura ideal para a etapa de revenimento.

6 REFERÊNCIAS

- ARBEGAST, W.J.; **A flow-partioned deformation zone model for defect formation during friction stir welding**. Scripta materialia, v.58, n.5, p. 372-376, mar 2008, p. 372-376.
- ASM, Atlas of isothermal transformation and cooling transformation diagrams, Materials Park, OH: **ASM International**, 1977, 422 p.
- BASTOS, S.C. **Efeito do aquecimento por indução eletromagnética de tubos sem costura utilizados em motores a Diesel**. 2009. Tese (Mestrado Profissional): Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. 65 p.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**, 4^aed, São Paulo: E Blucher, 2008.
- CHOI, Don-hyun et al. Hybrid Friction Stir Welding of High-carbon Steel. **Journal Of Materials Science & Technology**, [s.l.], v. 27, n. 2, p.127-130, fev. 2011
- CUNHA, A.P.A. **Caracterização mecânica e microestrutural de aços médio carbono microligados ao nióbio e molibdênio**. 2013. Tese (Doutorado)- Universidade Estadual de Campinas. Campinas.
- DAUGHERTY, R.A. Tempos de aquecimento em forno a gás e indução. New York: IEE. 1973
- DAVIES, E. J. Induction Heating Handbook. McGraw Hil. London, 1979. p. 426.
- DYNAMIC SYSTEMS INC. **Gleeble Users Training 2009**: Gleeble Systems and Applications.2009.
- FONSECA, E.B. **Simulação física do processo de soldagem por atrito com pino não consumível do aço inoxidável duplex UNS S32205**. 2013. Tese (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 96 p.

GRUM, J. A review of the influence of grinding conditions on resulting residual stresses after induction surface hardening and grinding. **Journal of Materials Processing Technology**, p.212-226, 2001.

HERMENEGILDO, T.F.C. **Soldagem por atrito com pino não consumível do aço de alta resistência ISO3183 X80M**. 2012. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 159 p.

MARCOMINI, J.B. **Fragilização da Martensita Revenida no Aço SAE 5160H**. 2008. Tese (Mestrado-Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

MATSUSHITA, M; KITANI, Y; IKEDA, R; **Applicability of Friction Stir Welding (FSW) to Steels and Properties of the Welds**; Jfe Technical Report. N.20, 2015.

MISHRA, R.S.; MAHONEY, M.W. **Friction Stir Welding and Processing**. Ohio: ASM International, 2007.

OLIVEIRA, G. L. G. **Soldagem Dissimilar dos Aços AISI 8630M e ASTM A182 F22 para Aplicações Subaquáticas**. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais)-Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, UFC, Fortaleza, 2013.

PARK, S.H.C., SATO, Y.S., KOKAWA, H. **Boride Formation Induced by PCBN Tool Wear in Friction Stir Welded Stainless Steels**. Artigo – Revista Metallurgical and Materials Transactions, Volume 40, Número 03, Março 2009

PINHEIRO, P. H. M. **Efeitos da temperatura de interepasse sobre as alterações metalúrgicas e propriedades mecânicas de juntas dissimilares do aço ASTM A182- F22 soldadas com ligas de níquel**. Tese (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais)-Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, UFC, Fortaleza, 2014

PRADEEP, A. **A review on Friction Stir Welding of Steel**. Artigo – Revista International Journal of Engineering Research and Development, Volume 3, Edição 11, 2012

ROSATO Júnior, A. **Estrutura Integral por Soldagem por Atrito - Friction Stir Welding – FSW – Requisitos Básicos Para O Projeto Estrutural.**, 2003, Tese (Mestrado) ITA, São José dos Campos. 262 p.

RUDNEV, V. I., COOK, R. L., DON, L., & Black, M. R. **INDUCTOHEAT**, Inc. Michigan: Madison Heights. 1997.

SANTOS, Tiago Felipe de Abreu; TORRES, Edwar Andrés; RAMIREZ, Antonio Jose. Soldagem por Atrito com Pino Não Consumível de Aços Inoxidáveis Duplex. **Soldagem & Inspeção**, [s.l.], v. 21, n. 1, p.59-69, mar. 2016.

STEVENS, N. Induction Hardening and Tempering, Heat Treating, Metals Handbook, vol 4, n.9 p. 451-483, 1981

SU, J.Q.; NELSON, T.W.; MISHRA, R.; MAHONEY, M. Microstructural Investigation of Friction Stir Welded 7050-T651 Aluminium. **Acta Materialia**, v. 51, n°. 3, p. 713-729, 2003.

THEODORO, M.C. **Soldagem por atrito com pino não-consumível em juntas dissimilares de aços inoxidáveis austenítico UNS S31603 e superduplex UNS 32750**. 2013. Tese (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 97 p.

THOMAS, W.M.; NICHOLAS, E.D.; NEEDHAM, J.C.; MURCH, M.G.; TEMPLESMITH, P.; DAWES, C.J. **International Patent Application No. PCT/GB92/02203 and GB Patent Application No. 9125978.8**. Dezembro de 1991.

TUDBURY, C. **Basics of Induction Heating vol 1 and 2**. John F. Rider, New York. 1960

ANEXO A – CORPO DE PROVA PARA GLEEBLE

