



João Renato Fronza Spohr

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE DIFERENTES
MATERIAIS UNIDOS ATRAVÉS DO PROCESSO DE
SOLDAGEM CAPACITIVA**

Horizontina

2015

João Renato Fronza Spohr

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE DIFERENTES
MATERIAIS UNIDOS ATRAVÉS DO PROCESSO DE SOLDAGEM
CAPACITIVA**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina.

ORIENTADOR: Richard Thomas Lermen, Dr.

Horizontina

2015

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:

**“Caracterização Microestrutural de Diferentes Materiais Unidos Através do
Processo de Soldagem Capacitiva”**

Elaborada por:

João Renato Fronza Spohr

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica

**Aprovado em: 29/10/2015
Pela Comissão Examinadora**

**Prof. Dr. Richard Thomas Lermen
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador**

**Prof. Me. Valtair de Jesus Alves
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Prof. Esp. Evandro Fernandes Scalabrin
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Horizontina
2015**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus queridos pais Liani e José João Spohr, ao meu irmão Marcelo e aos demais incentivadores que sempre prestaram apoio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço de coração a todas as pessoas que de maneira humilde e simples estiveram ao meu lado, me apoiando, me corrigindo e dando conselhos positivos ao longo desta jornada acadêmica.

Agradeço a empresa que disponibilizou as instalações de seu laboratório de materiais para parte da realização prática.

Agradecimento único aos meus Pais. Obrigado por tudo, esta conquista também pertence a vocês.

Um obrigado especial ao Prof. Dr. Richard Thomas Lermen, pelo seu tempo, dedicação e orientação.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo a realização da soldagem capacitiva de diferentes materiais, analisando o efeito de diferentes energias sobre a evolução microestrutural e perfis de microdureza da região soldada. Foram utilizados três diferentes aços: aço carbono SAE 1045, aço DOMEX 700MC e aço DOCOL DP 1000. Para soldagem dos aços foi utilizado um banco de capacitores que possibilita diferentes energias. A caracterização dos materiais foi realizada através de ensaios de microdureza e metalografia. Através dos resultados verificou-se que o processo de soldagem por descarga capacitiva gera uma ZAC de curta extensão, indiferente do tipo de aço e energia média de soldagem. Para os três tipos de aço utilizados e para as diferentes energias médias de soldagem a microestrutura formada na ZAC foi martensita. Também na ZAC, foi encontrada uma microdureza superior a 500 HV para o aço SAE 1045 e microdureza superior a 400 HV nos aços DOMEX 700MC e DOCOL DP 1000. Assim, o aço carbono SAE 1045 apresentou o maior nível de microdureza na ZAC comparado aos aços DOMEX 700MC e DOCOL DP 1000.

Palavras-chave:

Soldagem Capacitiva. Microestrutura. Microdureza.

ABSTRACT

This work focuses on the realization of capacitive discharge welding of different materials, analyzing the effect of different energies on the microstructural evolution and microhardness of the welded area. Three different steels were used: carbon steel grade SAE 1045, steel DOMEX 700MC and steel DOCOL DP 1000. For welding of steels was used a capacitor bank that allows different energies. The material characterization was performed using microhardness testing and metallography. From the results it was found that the welding process by capacitive discharge generates a HAZ with short extension, regardless of the type of steel and average welding energies. For three types of steels used and the different average energies welding the microstructure formed at HAZ is martensite. Also in the HAZ, it was found a higher hardness than 500 HV in the SAE 1045 steel and microhardness higher than 400 HV in the DOMEX 700MC and DOCOL DP 1000 steels. So the carbon steel SAE 1045 had the highest level of microhardness in the HAZ compared to steel DOMEX 700MC and DOCOL DP 1000.

Keywords:

Capacitive Welding. Microstructure. Microhardness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Etapas do processo de soldagem capacitiva.	14
Figura 2: Ilustração de requisitos de qualidade para a solda de pinos.	15
Figura 3: Regiões características da ZAC. (ZF) – Zona de Fusão (solda); (a) – região de crescimento de grão; (b) – região de refino de grão; (c) – região intercrítica; (MB) – Metal Base.	16
Figura 4: Microestrutura do aço 1045 e da ZAC, com as endentações do ensaio de microdureza. Martensita (M). Ataque químico, Nital 1%.	17
Figura 5: Diagrama de transformação de resfriamento contínuo. (a) Ferrita e Perlita (b) Martensita.	19
Figura 6: Microestrutura do aço ABNT 1045 no estado de fornecimento. Ferrita (formação clara) e perlita (formação escura). Ampliação 133X, ataque Nital 2%.	21
Figura 7: Microestrutura do aço DOMEX 700MC. Ferrita (F), perlita (P) e martensita (M). Ataque com Nital 2%.	22
Figura 8: Microestrutura do aço DOCOL DP 1000. Ferrita (F) e Martensita (M). Ataque Nital 2%.	24
Figura 9: Circuito elétrico do banco de capacitores.	26
Figura 10: Banco de capacitores.	26
Figura 11: Dispositivo de forjamento.	27
Figura 12: Aparato experimental para os testes de soldagem.	28
Figura 13: Corpos de prova soldados. (a) chapa base aço SAE 1045 com Energia média 1 de 64 J; (b) chapa base aço DOMEX 700MC com Energia média 2 de 128 J; (c) chapa base aço DOCOL DP 1000 com Energia média 3 de 192 J.	28
Figura 14: Microestrutura do aço 1045. Atacada com Nital 3,5%. Ampliação 100X. (F) Ferrita;(P) Perlita.	32
Figura 15: Micrografia das amostras do aço 1045, mostrando a microestrutura do Material Base (MB), da Zona Afetada pelo Calor (ZAC) e microestrutura do Pino. Ferrita (F) e Perlita (P). Atacada com Nital 3,5%. Ampliação 200X.	33
Figura 16: Micrografia da amostra do aço 1045, mostrando a microestrutura da Zona Afetada pelo Calor (ZAC) formada por Martensita (M). Atacada com Nital 3,5%. Ampliação 500x.	33
Figura 17: Perfil de microdureza das amostras do aço 1045 soldadas com os 6 níveis de energia média e endentações separadas com 0,03 mm.	34
Figura 18: Micrografia mostrando as endentações do ensaio de microdureza de uma das amostras. Atacada com Nital 3,5%. Ampliação 100X.	35

Figura 19: Microestrutura do aço DOMEX 700MC. Atacada com Nital 3,5%. Ampliação 200X. (F) Ferrita;(P) Perlita; (M) Martensita.	36
Figura 20: Micrografia da amostra do aço DOMEX 700MC, mostrando a microestrutura do Material Base (MB), da Zona Afetada pelo Calor (ZAC) e microestrutura do Pino. Ferrita (F), Perlita (P) e Martensita (M). Atacada com Nital 3,5%. Ampliação 200X.....	37
Figura 21: Micrografia da amostra do aço DOMEX 700MC, mostrando a microestrutura da Zona Afetada pelo Calor (ZAC) formada por Martensita (M). Atacada com Nital 3,5%. Ampliação 500x.	37
Figura 22: Perfil de microdureza das amostras do aço DOMEX 700MC soldadas com os 6 níveis de energia média e endentações separadas com 0,03 mm.	38
Figura 23: Micrografia mostrando as endentações do ensaio de microdureza de uma das amostras. Atacada com Nital 3,5%. Ampliação 100X.....	39
Figura 24: Microestrutura aço DOCOL DP 1000. Atacada com Nital 3,5%. Ampliação 200X. (F) Ferrita; (M) Martensita.	40
Figura 25: Micrografia da amostra do aço DOCOL DP 1000, mostrando a microestrutura do Material Base (MB), da Zona Afetada pelo Calor (ZAC) e microestrutura do Pino. Ferrita (F), Perlita (P) e Martensita (M). Atacada com Nital 3,5%. Ampliação 200X.....	41
Figura 26: Micrografia da amostra do aço DOCOL DP 1000, mostrando a microestrutura da Zona Afetada pelo Calor (ZAC) formada por Martensita (M). Atacada com Nital 3,5%. Ampliação 500x.	41
Figura 27: Perfil de microdureza das amostras do aço DOCOL DP 1000 soldadas com os 6 níveis de energia média e endentações separadas com 0,03 mm.	42
Figura 28: Micrografia mostrando as endentações do ensaio de microdureza de uma das amostras. Atacada com Nital 3,5%. Ampliação 100X.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química aço SAE 1045.	20
Tabela 2 – Propriedades mecânicas estimadas aço SAE 1045.	20
Tabela 3 – Composição química do aço DOMEX 700MC.	22
Tabela 4 – Propriedades mecânicas do aço DOMEX 700MC.	23
Tabela 5 – Composição química do aço DOCOL DP 1000.	23
Tabela 6 – Propriedades mecânicas do aço DOCOL DP 1000.	23
Tabela 7 – Composição química da amostra aço SAE 1045.	31
Tabela 8 – Composição química da amostra aço DOMEX 70MC.	35
Tabela 9 – Composição química da amostra aço DOCOL DP 1000.	40

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1. JUSTIFICATIVA.....	11
1.2. OBJETIVOS.....	12
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	13
2.1 SOLDAGEM POR DESCARGA CAPACITIVA	13
2.1.1 ZONA AFETADA PELO CALOR (ZAC)	15
2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AÇOS	17
2.2.1 Aço SAE 1045	19
2.2.2 Aço DOMEX 700MC.....	21
2.2.3 Aço DOCOL DP 1000.....	23
3 METODOLOGIA	25
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	25
3.2 DISPOSITIVO DE SOLDAGEM.....	25
3.3 SOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	27
3.4 ANÁLISES E ENSAIOS	29
3.4.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA	29
3.4.2 MACROGRAFIAS E MICROGRAFIAS	29
3.4.3 MICRODUREZA.....	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
4.1 CARACTERIZAÇÃO AÇO SAE 1045.....	31
4.2 CARACTERIZAÇÃO AÇO DOMEX 700MC	35
4.3 CARACTERIZAÇÃO AÇO DOCOL DP 1000	39
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	44
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46

1 INTRODUÇÃO

Paralelo aos investimentos e ambições das organizações industriais, evidencia-se o contínuo avanço tecnológico lançando oportunidades as áreas de desenvolvimento e manufatura. Alinhado, o processo de soldagem por descarga capacitiva é recente quando comparado aos demais processos convencionais de soldagem. Este processo caracteriza-se pela elevada velocidade de realização, obtendo tempo baixo para fusão do material e conseqüentemente alta taxa de resfriamento na região soldada.

Deste modo, algumas lacunas e informações referentes a solda executada pelo processo de descarga capacitiva necessitam ser investigadas, principalmente questões relacionadas a região afetada pelo calor da solda, dureza e microestrutura formada, respostas que podem caracterizar uma junta soldada de forma positiva ou negativa para determinada aplicação funcional específica. Por exemplo, se a região soldada estará somente exposta ao desgaste, julga-se necessário um aumento de dureza desta região, ou se a região soldada estará sujeito a esforços e impactos, indica-se um menor nível de dureza na junta.

A análise microestrutural juntamente com medições de microdureza deve ser considerada para aplicações em soldagem, essa análise pode prever áreas críticas relacionadas a defeitos e até encontrar uma relação controlada entre o processo de soldagem, o resfriamento e a evolução da microestrutura.

1.1 JUSTIFICATIVA

Soldagem por descarga capacitiva é um processo de fabricação inovador com alto potencial de automação e robotização, também possibilita a união de componentes com propriedades químicas e mecânicas diferentes. Na indústria, é perceptível a sua aplicação na soldagem de pinos através de robôs de solda específicos. Neste processo a descarga capacitiva é muito rápida, tempo de operação é da ordem dos milissegundos, proporcionando uma alta taxa de resfriamento e, conseqüentemente, uma estreita zona afetada pelo calor (ZAC). Devido as elevadas taxas de resfriamento, diferentes microestruturas podem surgir.

As características do processo de soldagem por descarga capacitiva geram respostas colaborativas para evoluções microestruturais e alterações nos níveis de microdureza. Quando realizado um processo de soldagem específico, as alterações estruturais formadas na ZAC necessitam ser investigadas, a análise das microestruturas formadas contribuem na prevenção de concentrações críticas e possíveis defeitos relacionados a junta soldada. A microestrutura formada e microdureza indicarão fatores de fragilidade, tenacidade e funcionalidade da junta soldada.

Por conseguinte, utilizando um dispositivo para soldagem por descarga capacitiva, decidiu-se unir corpos de prova do aço ao carbono SAE 1045, aço DOMEX 700MC e aço DOCOL DP 1000, a fim de evidenciar informações a respeito de transformações da microestrutura e valores de microdureza nas regiões afetadas da junta soldada, pois não se tem estudo detalhado a respeito do efeito de altas taxas de resfriamento oriundas do processo de soldagem por descarga capacitiva sobre estes aços.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo a realização de soldagem capacitiva de diferentes materiais, determinando o efeito de diferentes energias médias de soldagem sobre a evolução microestrutural e perfis de microdureza da região soldada.

Alinhados ao objetivo principal, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Soldar corpos de prova com diferentes energias utilizando três diferentes aços: aço SAE 1045, DOMEX 700MC e DOCOL DP 1000;
- Analisar a microestrutura da junta soldada;
- Determinar os perfis de microdureza nas juntas soldadas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão de literatura apresenta informações e conceitos gerais envolvidos com os conteúdos abordados e necessários para o desenvolvimento deste trabalho. De maneira objetiva, está disponível assuntos relacionados ao processo de soldagem por descarga capacitiva e também uma caracterização geral dos materiais utilizados neste trabalho.

2.1 SOLDAGEM POR DESCARGA CAPACITIVA

Baseando-se nos princípios básicos de união de materiais, a soldagem capacitiva caracteriza-se por fazer parte do grupo da solda por resistência. Nesse processo, não é necessário a deposição de material para a formação da união soldada, diferente do processo convencional de soldagem por arco elétrico (ENTRON, 1998). Soldagem por resistência elétrica ocorre através da geração de calor formada pela passagem da corrente elétrica, também a resistência do conjunto à passagem de corrente e pela aplicação de pressão no local (BRANDI; MELLO; WAINER, 2004).

Atualmente, grande parte dos processos de soldagem utilizados faz o uso de energia proveniente de uma fonte externa de eletricidade. Uma das características do processo de soldagem por descarga capacitiva é a utilização de um banco de capacitores como fonte de energia. A energia dos capacitores é recarregada entre os intervalos de soldagem (FUSION SOLUTION, 2001).

A soldagem por descarga capacitiva é empregada, principalmente, na soldagem de pinos e fixadores. Soldagem de pinos em tubos de trocadores de calor na indústria de caldeiras; solda de fixadores em estruturas metálicas, sem a necessidade de realizar uma furação na estrutura; na construção elétrica e automotiva está substituindo uniões roscadas e peças de fixação (GIMENES e TREMONTI, 1995). Para um melhor entendimento do processo, a Figura 1 exemplifica as 4 principais etapas.

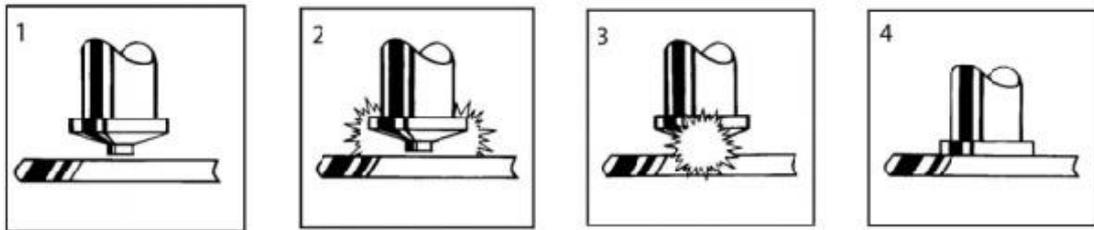


Figura 1: Etapas do processo de soldagem capacitiva. Fonte: Adaptado de TRU-WELD Stud Welding, 2013.

A etapa 1 representa o posicionamento do pino ignitor próximo a chapa base, com o polo positivo conectado ao pino e o negativo a chapa; na etapa 2 o equipamento é acionado e o pino ignitor entra em contato com a chapa base ocorrendo a abertura do arco elétrico; já na etapa 3 o pino ignitor segue pressionado contra a chapa base, formando a poça de fusão devido a elevada resistência formada no local e por fim na etapa 4 extingue-se o arco, a união solidifica-se com a conclusão do processo em uma fração de segundos (TRU-WELD, 2013).

De acordo com a descrição das etapas, o processo de solda por descarga capacitiva é rápido, caracteriza-se pela elevada velocidade em que é finalizado, com tempo menor que 10 milissegundos para a fusão e solidificação. Desta forma, a união dos materiais em tempo reduzido, determina um alto aquecimento e alto resfriamento na região dos componentes atingidos pela solda. Também, com este curto espaço de tempo impossibilita que os materiais tenham um crescimento de tamanho de grão considerável e que tenham grandes áreas afetadas pelo calor da solda (FUSION SOLUTION, 2001).

Em relação a alguns requisitos de qualidade e inspeção visual aplicados na soldagem de pinos por meio do processo de descarga capacitiva, a ANSI/AWS C5.4 (1993), recomenda que a fusão da solda deve ser completa em torno dos 360 graus do pino e seguir um ângulo perpendicular entre a chapa base e o pino, a ilustração está demonstrado na Figura 2:

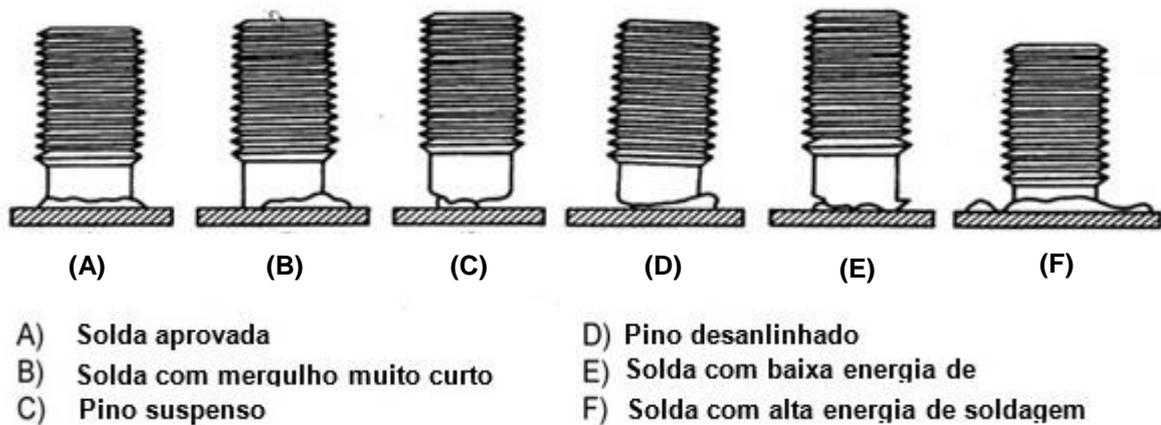


Figura 2: lustração de requisitos de qualidade para a solda de pinos. Fonte: Adaptado da norma ANSI/AWS C5.4, 1993.

A região localizada em torno do ponto onde a fusão e união de materiais foi realizada é considerada uma Zona Afetada pelo Calor (ZAC). Esta é a região submetida ao instantâneo aquecimento e resfriamento, provocando uma modificação nas fases da microestrutura dos materiais soldados e, conseqüentemente, um aumento dos níveis de microdureza. As transformações na região da ZAC variam de acordo com os parâmetros utilizados, incluindo tempo de permanência da ferramenta de soldagem, assim como taxas de aquecimento e resfriamento (MACHADO, 1996).

2.1.1 Zona Afetada pelo Calor (ZAC)

Na ZAC evidencia-se a alteração microestrutural do material de base na soldagem. As características apresentadas pela ZAC dependem essencialmente do tipo de material base, efeitos do ciclo térmico (velocidade de resfriamento) e do processo de solda executado. A ZAC é considerada a região próxima ao local de aplicação da solda. Nos casos de utilização de aços carbonos e baixa liga, a ZAC pode apresentar algumas regiões características, as quais também surgem de acordo com alguns processos de soldagem, o tipo de processo de soldagem executado também define o tamanho da zona afetada pelo calor de solda (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011). Essas regiões podem ser visualizadas através da Figura 3.

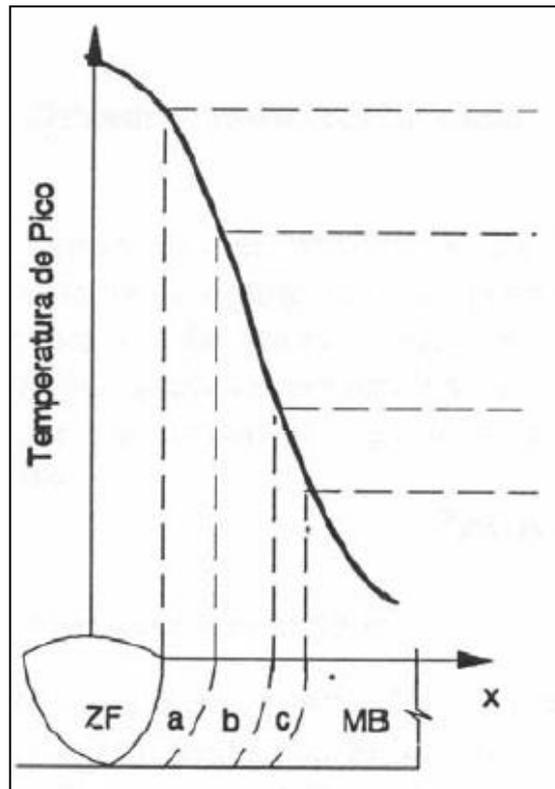


Figura 3: Regiões características da ZAC. (ZF) – Zona de Fusão (solda); (a) – região de crescimento de grão; (b) – região de refino de grão; (c) – região intercrítica; (MB) – Metal Base. Fonte: Adaptado de MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011.

A região de crescimento de grão é o ponto do metal base mais próximo da solda, conseqüentemente, submetido a maiores temperaturas. Esta região é representada por uma estrutura de granulação grosseira, se a condição de soldagem submetida for de rápido resfriamento e aplicado em aços com alto teor de carbono ou aços ligados, resultam, desta região, a formação de martensita. A região do crescimento de grão torna-se problemática, com baixa tenacidade, possibilita o surgimento de trincas, por outro lado, a microestrutura desta região pode ser ajustada, selecionando condições adequadas de antes e durante a soldagem (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Após o ponto de crescimento do grão, em seqüência, compreende a região de refino do grão, situada como uma porção da junta que também sofre o aquecimento em menor escala. Mesmo depois da aplicação do processo de soldagem, esta região apresenta microestrutura fina de ferrita e perlita, exceto quando aplicado algum tratamento térmico ou revenimento extra sobre o conjunto (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Na região intercrítica, poucas mudanças microestruturais são perceptíveis, são pontos mais afastados da solda. Em casos isolados, de soldagem específicas ou de solda de vários passes, constituintes de elevada dureza e tenacidade podem se formar (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Relacionado a microestrutura formada na região da ZAC para processos com elevadas taxas de resfriamento, Verástegui (2007), analisou a microestrutura de pontos fundidos na superfície de aços através do processo a laser, o qual atinge altas taxas de resfriamento. Em um dos testes, foi utilizado o aço carbono 1045 e para demonstração da microestrutura encontrada na ZAC do aço SAE 1045, pode ser visualizada a Figura 4.

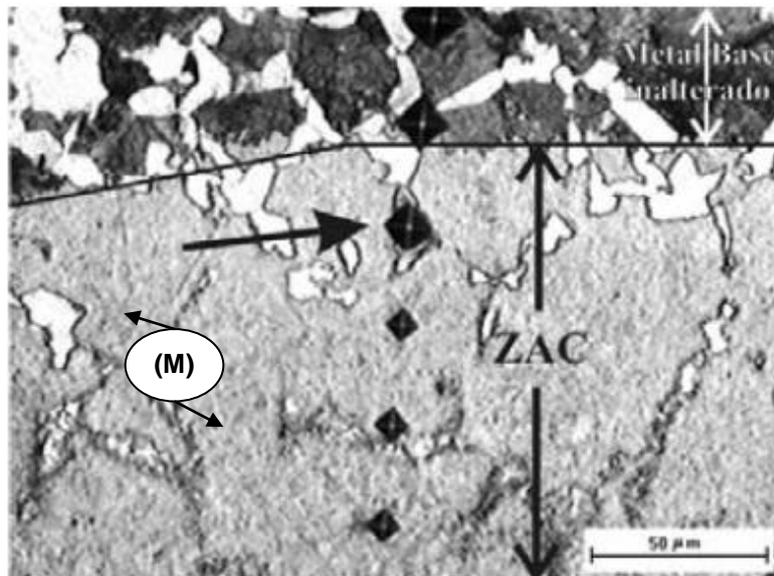


Figura 4: Microestrutura do aço 1045 e da ZAC, com as endentações do ensaio de microdureza. Martensita (M). Ataque químico, Nital 1%. Fonte: Adaptado de VERÁSTEGUI, 2007.

Verástegui (2007), define que a microestrutura provável na ZAC encontrada para o aço 1045 é martensítica, pois é uma zona onde ocorre a solubilização do carbono presente no material, deixando a região mais homogênea, assim a microestrutura martensítica está caracterizada por “agulhas” e alta microdureza.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AÇOS

Os aços são constituídos de ligas ferro-carbono, os quais podem conter concentrações de outros elementos de liga, existem diversos tipos de ligas de

composições químicas diferentes, propriedades mecânicas diferentes e tratamentos térmicos (CALLISTER, 2002).

Os aços, em maioria, são classificados de acordo com sua composição química. Modenesi (2002), orienta que os aços carbonos são denominados pelos níveis de Carbono, os aços carbonos também possuem em sua composição outros elementos químicos importantes como manganês e silício, com teores abaixo de 1,0 e 0,4%, respectivamente. A medida que o teor de Carbono aumenta a resistência mecânica do aço carbono também aumenta, porém a ductilidade e soldabilidade diminuem.

No princípio da constituição do aço, a temperatura de resfriamento e o teor de carbono pertencentes a determinado aço relacionam transformações na formação de sua microestrutura. Constituição estrutural e transformações que ocorrem em aços carbono entre 0 e 2,11% de carbono, a literatura define que os aços até 0,77% de carbono são chamados de hipoeutetóides e possuem microestrutura constituída por ferrita e perlita. Os aços com 0,77% de carbono apresentam microestrutura perlítica e são denominados de eutetóides, já os que possuem teor de carbono entre 0,77% e 2,11% a microestrutura formada é perlita e cementita e são chamados de hipereutetóides. Ainda, teor de carbono até 0,008% é chamado de ferro puro comercial e microestrutura predominantemente ferrítica (CHIAVERINI, 1982).

Alguns fatores e exigências levaram o mercado para o desenvolvimento de novos aços resistentes e mais leves, dentro destas diretrizes existem os aços microligados (baixa liga e alta resistência). Estes aços foram desenvolvidos com composição química similar aos aços de baixo teor de carbono, com adição de níveis controlados de elementos de liga. A alta resistência mecânica dos aços microligados ocorre devido a sua microestrutura de granulação relativamente fina e de seu processo de fabricação controlado (MODENESI, 2002).

A adição de alguns elementos de liga na composição química de determinados tipos de aços é comum na obtenção de melhores propriedades dos materiais, como dureza e resistência mecânica, assim convém observar que os elementos de liga como o manganês, cromo, silício, molibdênio, níquel, entre outros, tem a propriedade de produzir uma microestrutura perlítica apresentando um teor de carbono relativamente baixo. Revela-se interessante obter uma estrutura resistente, inteiramente perlítica, através da introdução de elementos de liga num aço com

menor teor de Carbono, a estrutura será mais dúctil e menos frágil, tornando-se mais tenaz comparada a estrutura de um aço carbono comum (CHIAVERINI, 1982).

Em relação ao beneficiamento dos aços carbonos ou aços ligados, seja no processo de produção, têmpera ou de solda, normalmente estes materiais sofrem algum tipo de aquecimento e resfriamento. Quando os aços são submetidos a velocidades de resfriamento relativamente elevadas, uma nova fase de microestrutura é obtida, a formação de martensita. A martensita caracteriza-se pela sua elevada dureza e desta forma torna-se frágil, quando uma amostra de aço é preparada para metalografia, nota-se que a martensita tem aspecto de agulhas ou lâminas finas (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

As formações da microestrutura de um aço em função da velocidade de resfriamento podem ser obtidas através de diagramas de transformação, esses diagramas podem ser aplicados a tratamentos térmicos e à soldagem. Para demonstração da microestrutura formada está disponível o diagrama de transformação na Figura 5:

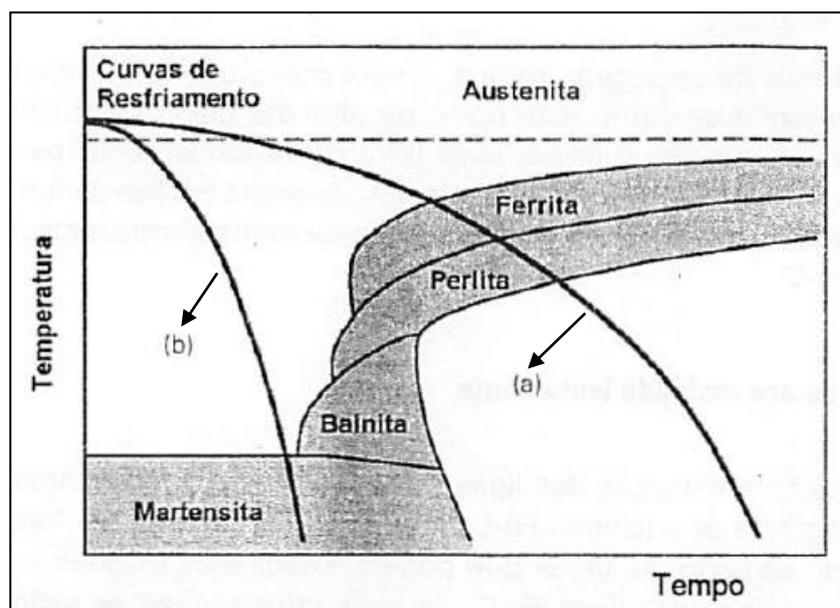


Figura 5: Diagrama de transformação de resfriamento contínuo. (a) Ferrita e Perlita (b) Martensita.
Fonte: Adaptado de MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011.

2.2.1 Aço SAE 1045

O aço 1045 é considerado um aço para construção mecânica com médio teor de carbono. Essas ligas podem ser tratadas termicamente e revenidas para melhorar as suas propriedades, por exemplo, aumentar a dureza e resistência ao desgaste do

material em determinado ponto. O aço 1045 é classificado por uma série de normas, entre elas é designado pela Sociedade de Engenheiros Automotivos (SAE – Society of Automotive Engineers) responsável por uma das especificações de composição química e propriedades mecânicas para este aço (CALLISTER, 2002).

A Tabela 1 e Tabela 2 contém a composição química e propriedades mecânicas, respectivamente, para o aço SAE 1045.

Tabela 1 – Composição química aço SAE 1045.

Aço	C%	Mn%	P%	S%
SAE 1045	0,42 – 0,50	0,60 – 0,90	Máx. 0,040	Máx. 0,050

Fonte: Adaptado norma SAE J403, 2009.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas estimadas aço SAE 1045.

Tensão de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência a Tração (MPa)
570 - 630	310 - 530

Fonte: Adaptado norma SAE J1397, 1992.

O aço com médio teor de Carbono, quando fabricado, é submetido a um resfriamento lento, formando uma microestrutura constituída de ferrita e perlita. (COLPAERT, 2000). O constituinte perlita é uma mistura formada por lamelas ou camadas alternadas de ferrita e cementita. Ferrita caracteriza-se por ser macia, dúctil e tenaz, ao contrário da cementita que é dura e frágil. Conseqüentemente, a perlita encontra-se em um nível intermediário com dureza elevada e média tenacidade. Quanto maior o teor de Carbono de um aço, tendem a apresentar níveis elevados de constituintes duros (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Martins (2002), em sua dissertação realizou uma caracterização experimental envolvendo o aço carbono ABNT 1045. Para demonstração da microestrutura do aço ABNT 1045 no seu estado de fornecimento, pode ser visualizada a Figura 6.

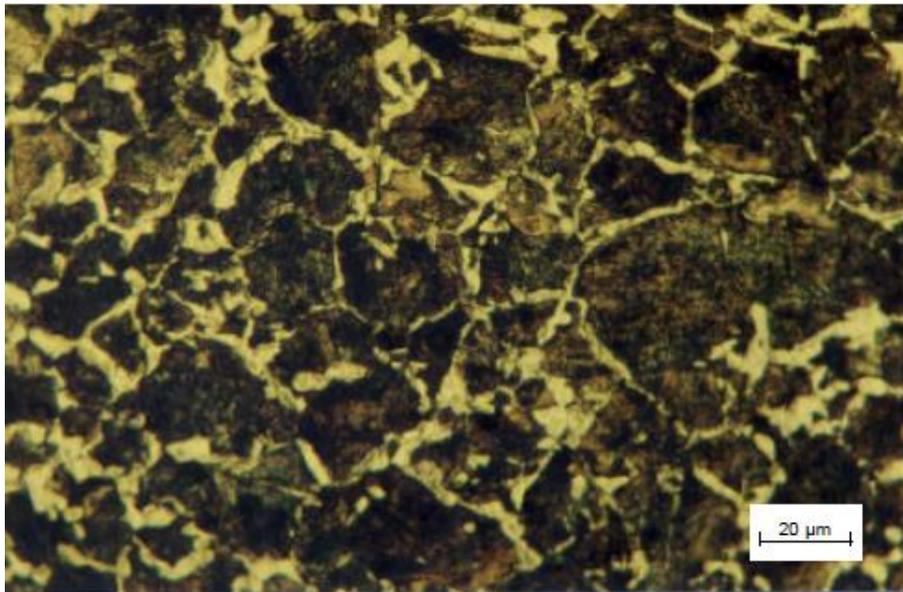


Figura 6: Microestrutura do aço ABNT 1045 no estado de fornecimento. Ferrita (formação clara) e perlita (formação escura). Ampliação 133X, ataque Nital 2%. Fonte: Adaptado de MARTINS, 2002.

2.2.2 Aço DOMEX 700MC

O aço DOMEX 700MC é uma marca registrada da siderúrgica SSAB, porém a nomenclatura e especificações para esse tipo de aço de alta resistência é descrita na Norma DIN EN 10149, sendo destinado como S700MC (SSAB TURNPLAT; DIN EN 10149-1 Apud RODRIGUES, 2012).

A nomenclatura do aço é acompanhada da sigla MC, a qual refere-se a uma gama de aços de alto limite de resistência elástica para a conformação a frio, assim como boa soldabilidade. Essas características permitem a utilização dos aços onde requer elevada resistência, juntamente com diminuição de peso de estruturas, aumentando a carga suportada (SSAB TURNPLAT; DIN EN 10149-1 Apud RODRIGUES, 2012).

A microestrutura característica deste aço é formada por uma matriz ferrítica, com ilhas de martensita e perlita. Rodrigues (2012), utilizou o aço DOMEX 700MC no desenvolvimento prático de sua dissertação, preparando amostras soldadas para análise. Para demonstração da microestrutura do material base (MB) do aço DOMEX 700MC, encontra-se disponível a Figura 7.

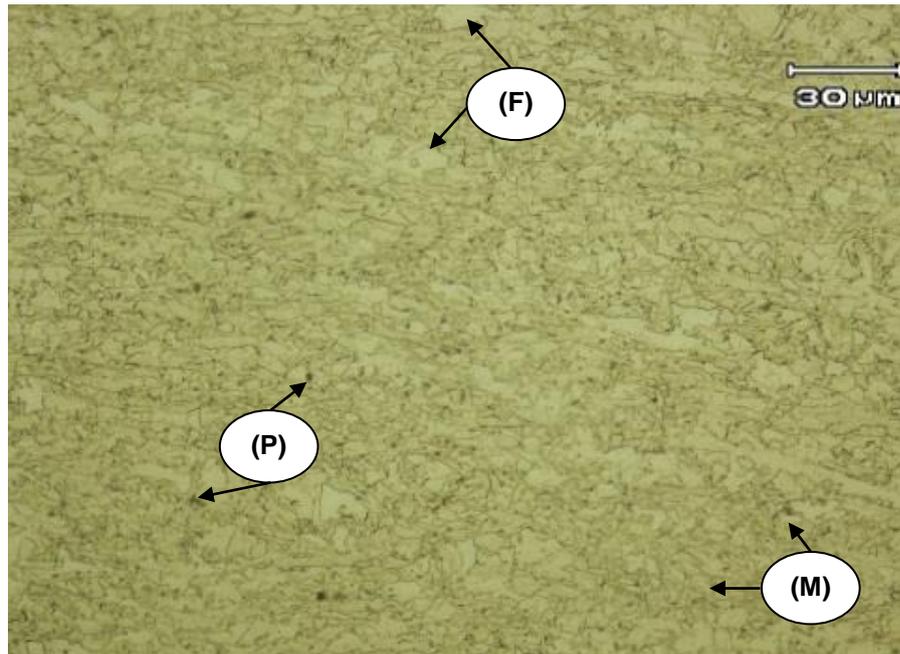


Figura 7: Microestrutura do aço DOMEX 700MC. Ferrita (F), perlita (P) e martensita (M). Ataque com Nital 2%. Fonte: Adaptado de RODRIGUES, 2012.

O aço DOMEX 700 têm como elementos de liga nióbio, titânio e vanádio, todos em baixa percentagem, desta forma possibilita que os teores de carbono e manganês mantenham-se baixos. Devido ao seu baixo teor de elementos de liga, o aço possibilita uma boa soldabilidade (FRISK Apud RODRIGUES, 2012).

A composição química disponibilizada pelo fabricante SSAB e pela norma DIN EN 10149, podem ser visualizadas na Tabela 3 e as propriedades mecânicas na Tabela 4.

Tabela 3 – Composição química do aço DOMEX 700MC.

Aço	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Al%	Nb%	V%	Ti%
SSAB DOMEX 700MC	Máx. 0,12	Máx. 0,10	Máx. 2,10	Máx. 0,025	Máx. 0,010	Mín. 0,015	Máx. 0,09	Máx. 0,20	Máx. 0,15
DIN EN S700MC	Máx. 0,12	Máx. 0,60	Máx. 2,10	Máx. 0,025	Máx. 0,015	Mín. 0,015	Máx. 0,09	Máx. 0,20	Máx. 0,22

- Nb + V + Ti=Máx. 0,22%; Mo=Máx. 0,50% e B=Máx. 0,005%.

Fonte: Adaptado de SSAB, 2003 e da norma DIN EN 10149-2, 2013.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas do aço DOMEX 700MC.

Tensão de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência a Tração (MPa)
700	750 - 950

Fonte: Adaptado de SSAB, 2003.

2.2.3 Aço DOCOL DP 1000

O Aço DOCOL DP 1000 também é produzido com marca registrada da siderúrgica SSAB. Caracteriza-se como um aço de alta resistência, o qual possui microestrutura constituída de ferrita e martensita, a ferrita é responsável por designar uma boa conformabilidade para o aço (constituente macio), já a martensita (constituente de fase dura) contribui para a resistência do material. Além da boa conformação e alta resistência, o aço possui uma composição química que justifica a boa soldabilidade para todos métodos de soldagem (SSAB, 2014).

Na Tabela 5 e na Tabela 6 são apresentados a composição química e as propriedades mecânicas, respectivamente, para o aço DOCOL DP 1000.

Tabela 5 – Composição química do aço DOCOL DP 1000.

Aço	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Al%	Nb%
DP 1000	Máx. 0,15	Máx. 0,50	Máx. 1,50	Máx. 0,010	Máx. 0,002	Mín. 0,040	Máx. 0,015

Fonte: Adaptado de SSAB, 2014.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas do aço DOCOL DP 1000.

Tensão de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência a Tração (MPa)
700 - 950	1000 - 1200

Fonte: Adaptado de SSAB, 2014.

Devido as baixas quantidades de elementos de liga e baixo carbono, juntamente com os baixos níveis de fósforo e enxofre, os aços DP são considerados

de boa soldabilidade, assim diminuindo a presença de defeitos de soldagem relacionados ao metal base (KOU, 2003).

As letras DP que acompanham a nomenclatura deste aço significam “*Dual Phase*” ou duas fases, são materiais com característica de microestrutura tipicamente bifásica, onde uma das fases é uma matriz ferrítica e outra pontos dispersos do constituinte martensita. Desta forma, permitem alinhar alta ductilidade à elevada resistência mecânica, com limites de resistência a tração variando de 500 a 1200 MPa (HERNANDEZ et al. Apud ROCHA, 2014).

Rocha (2014), em seu estudo trabalhou nas propriedades metalúrgicas de juntas soldadas para o aço DOCOL DP 1000, e referente a microestrutura do material base DOCOL DP 1000 estão presentes a ferrita (fase clara) e martensita (fase escura), a microestrutura do aço pode ser visualizada na Figura 8.

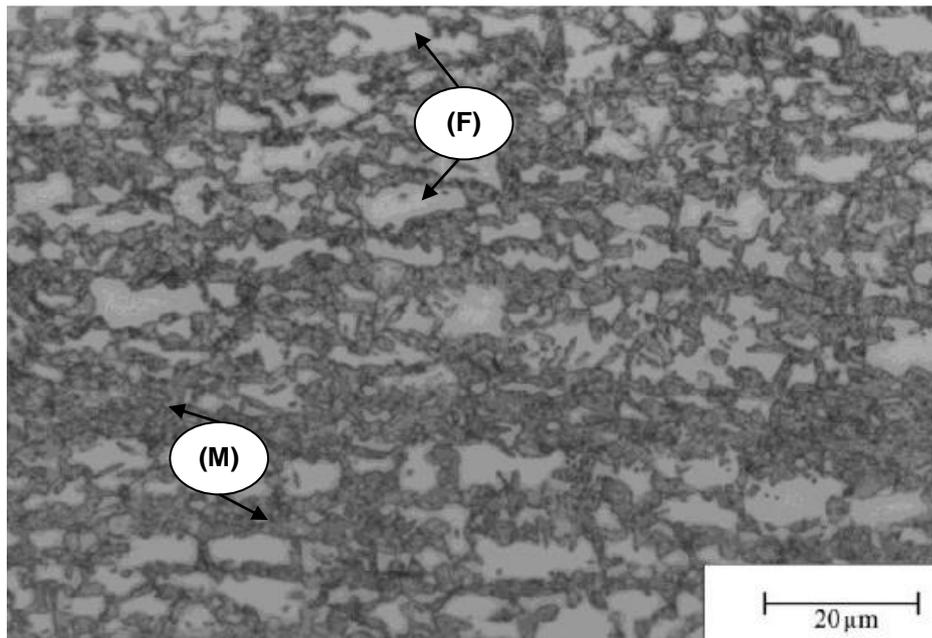


Figura 8: Microestrutura do aço DOCOL DP 1000. Ferrita (F) e Martensita (M). Ataque Nital 2%.
Fonte: Adaptado de ROCHA, 2014.

3 METODOLOGIA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para o desenvolvimento deste estudo foi utilizado um tipo de aço carbono e dois exemplares de aço baixa liga. Os três aços foram disponibilizados pela Faculdade Horizontina – FAHOR. Especificamente, os seguintes aços foram selecionados: aço ao carbono SAE 1045, aço DOMEX 700MC e aço DOCOL DP 1000.

Para caracterização dos materiais de base, foram realizados ensaios de composição química, metalografia (microestrutura) e microdureza do material. Os três ensaios foram desenvolvidos através dos equipamentos disponíveis dentro das instalações do Laboratório de Materiais de uma empresa de Horizontina.

Os corpos de prova dos aços foram manufaturados e divididos em pequenas amostras, formando amostras de chapa com aproximadamente 25 x 35 mm de aresta e mantendo a espessura original de cada formato, isto é, para o aço SAE 1045 a espessura original foi 6 mm, para o DOMEX 700MC a espessura foi 3 mm e para o aço DOCOL DP 1000 a espessura da chapa foi 1,5 mm.

3.2 DISPOSITIVO DE SOLDAGEM

O dispositivo para soldagem é dividido em três partes distintas: o banco de capacitores, o dispositivo de forjamento e a fonte de alimentação para carregar os capacitores. O dispositivo de soldagem é limitado a unir corpos de prova constituídos de um pino junto a determinada chapa de base.

O banco de capacitor do dispositivo é formado por 12 capacitores eletrolíticos, os quais operam com tensões de 80 V e capacitância de 10 mF.

Beck (2014), orienta na construção deste equipamento, que a fonte de 110 V de alimentação do banco de capacitores não poderia ser ligada diretamente a um capacitor, ocasionaria sobrecarga danificando o sistema. Assim, tem-se dois capacitores ligados em série, neste tipo de ligação a tensão é dividida igualmente entre os dois capacitores, então os capacitores são expostos a 55 V. Ainda, com a

ligação em série, a capacitância total é diminuída, a capacitância final entre os dois ligados passa a ser 5 mF.

O banco de capacitores permite 6 níveis de capacitância disponibilizada para a aplicação da soldagem com o dispositivo, isso é possível pois há seis ligações de capacitores em paralelo. Os capacitores ligados em paralelo entre si, geram um somatório das capacitâncias, com o equipamento trabalhando de 5 mF, 10 mF, 15 mF, 20 mF, 25 mF e 30 mF, isso através do acionamento de chaves seletoras liga/desliga localizadas em cada uma das linhas dispostas em série (BECK, 2014).

A energia média de soldagem (E) fornecida no acionamento de cada chave seletora, equivalente aos capacitores em paralelo considerando 160 Volts (valor foi medido com multímetro), foi determinada para capacitância de 5 mF energia média E_1 de 64 J; para 10 mF, E_2 de 128 J; para 15 mF, E_3 de 192 J; para 20 mF, E_4 de 256 J; para 25 mF, E_5 de 320 J e para 30 mF, E_6 de 384 J. Na Figura 9 e na Figura 10, respectivamente, podem ser visualizados o circuito elétrico e o banco de capacitores.

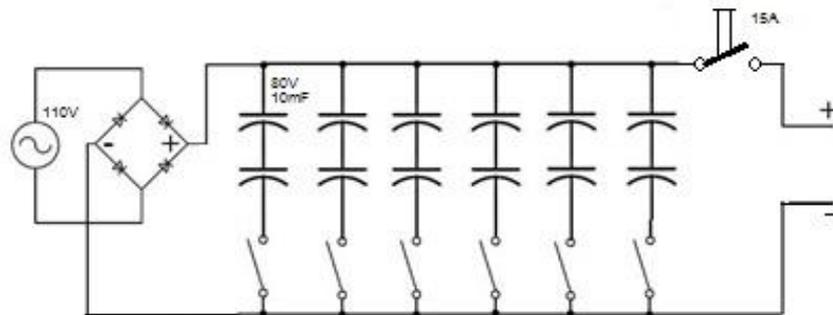


Figura 9: Circuito elétrico do banco de capacitores.



Figura 10: Banco de capacitores. Fonte: Adaptado de Desenvolvimento de um Dispositivo para Soldagem Capacitiva (BECK, 2014).

O dispositivo de forjamento é alimentado pela conexão da corrente negativa e positiva gerada pelo banco de capacitores, e com funções de fixar, direcionar e pressionar os componentes a serem soldados.

O sistema é disposto de chapas e pinos de aço, juntamente com materiais isolantes na extremidade de contato para o acionamento. É composto de pinos-guia onde movimenta-se uma placa deslizante com um movimento de sobe/desce após a liberação do gatilho de acionamento. O dispositivo utilizado é mostrado na Figura 11.

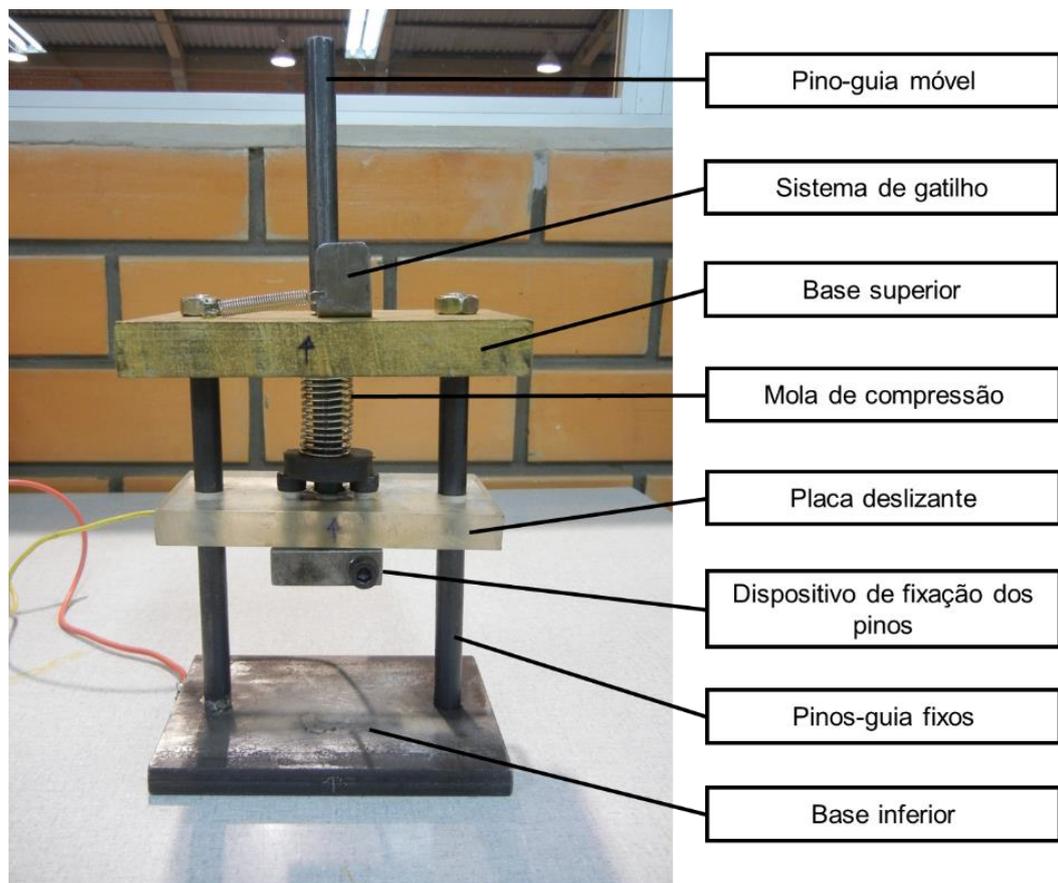


Figura 11: Dispositivo de forjamento. Fonte: Adaptado de Desenvolvimento de um Dispositivo para Soldagem Capacitiva (BECK, 2014).

3.3 SOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Para a soldagem dos corpos de prova constituídos por uma chapa base retangular e um pino. Definiu-se utilizar amostras em forma de pino usinadas e retiradas de pregos, os quais são confeccionados de arame trefilado, de material com baixo teor de carbono e possuem diâmetro de 2,5 mm.

O dispositivo de soldagem permitiu realizar a união dos corpos de prova variando seis níveis de energia média capacitiva, acionando as chaves seletoras. Com a utilização de três tipos de aços diferentes na chapa base e utilizando o mesmo material para as amostras dos pinos, no total, foram soldados 18 corpos de prova para a submissão de análises em laboratório de materiais.

O banco de capacitores foi alimentado por uma fonte de 110 V, e este conectado através dos polos negativo e positivo no dispositivo de forjamento. O polo negativo foi conectado ao ponto onde o pino de soldagem é fixado, já o polo positivo foi ligado a base do dispositivo, onde está em contato com a chapa base para a soldagem. Disposição dos testes de soldagem disponível na Figura 12.

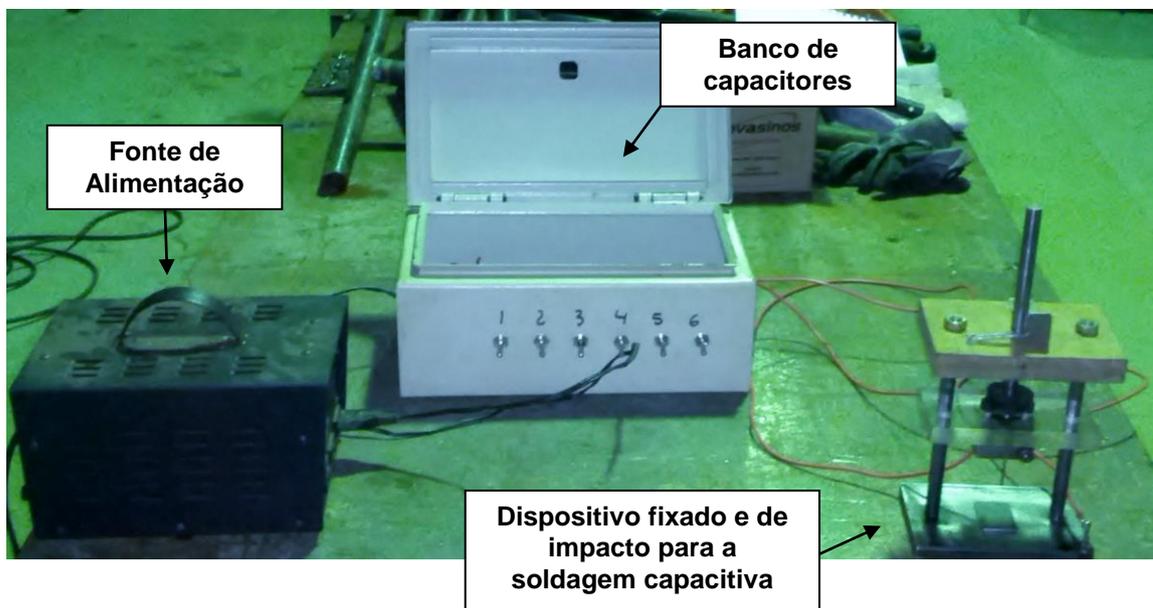


Figura 12: Aparato experimental para os testes de soldagem.

A Figura 13 mostra a aparência de alguns dos corpos de prova soldados através do dispositivo para análise experimental.



Figura 13: Corpos de prova soldados. (a) chapa base aço SAE 1045 com Energia média 1 de 63 J; (b) chapa base aço DOMEX 700MC com Energia média 2 de 128 J; (c) chapa base aço DOCOL DP 1000 Energia média 3 de 192 J.

3.4 ANÁLISES E ENSAIOS

A partir dos corpos de prova soldados, iniciou-se a análise das fases microestruturais formadas, para isso, tornou-se necessário a transformação dos corpos de prova soldados em amostras embutidas em baquelite.

As amostras foram cortadas com a máquina de corte Discotom-2 da STRUERS, com o disco de corte passando ao centro do pino e da região termicamente afetada pelo calor. Depois de cortadas, as amostras foram embutidas através da Simplimet 2000 marca BUEHLER.

Em sequência, após o embutimento, as amostras necessitaram ser lixadas, polidas e atacadas para permitir a visualização da junta soldada, da microestrutura formada e facilitar o ensaio de microdureza. A preparação das amostras foi realizada na máquina politriz Ecomet 4 da BUEHLER, utilizando nesta ordem, uma lixa de 15 μm com água, lixa de 9 μm com fluido DiaDuo-2 9 μm , pano com fluido DiaDuo-2 6 μm e por último outro pano com fluido de polimento DiaDuo-2 de 3 μm . Em seguida as amostras foram atacadas com uma solução Nital concentração 3,5%, formada com 96,5% de álcool etílico e 3,5% ácido nítrico.

3.4.1 Composição química

A realização do ensaio para definir a composição química dos materiais de base selecionados ocorreu através da utilização do equipamento Espectrômetro Shimadzu PDA-7000. Este equipamento realiza a leitura da porcentagem de elementos químicos que constituem o aço.

3.4.2 Macrografias e Micrografias

Com a preparação dos processos de metalografia concluídos, a captura das imagens de microestrutura do pino, material de base e da zona afetada pelo calor de soldagem formadas nos corpos de prova, foi através do uso de um microscópio de luz marca Olympus modelo BX51M e trabalhadas com câmera e software de metalografia marca MIPS Sistemas modelo Digimet Plus 5G.

Também foram capturadas imagens de macrografias da região soldada, por meio de um macroscópio marca Shimadzu e aumento de 6,4 vezes.

3.4.3 Microdureza

A microdureza foi verificada através de um microdurômetro baseado no método *Hardness Vickers* (HV) de marca Shimadzu modelo *type* M-4185, com cargas utilizadas nos ensaios de 100 e 200 gramas e tempo de 15 segundos. Realizaram-se perfis de microdureza na seção longitudinal em relação ao pino, desde o aço de base inalterado pelo calor da solda e cruzando na região afetada pelo calor até o material do pino inalterado, isso verificando-se a microdureza em intervalos de 0,03 mm.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados são organizados em relação aos três tipos de materiais utilizados para a soldagem, onde a análise de composição química, da microestrutura e de microdureza das fases formadas são apresentados.

4.1 CARACTERIZAÇÃO AÇO SAE 1045

A composição química encontrada para a amostra do aço base SAE 1045 atende aos requisitos exigidos por diversas normas que estabelecem os limites para os elementos químicos, como a norma SAE J403, especificada na revisão de literatura para o aço SAE 1045. A Tabela 7 mostra os valores encontrados para a composição química da amostra do aço SAE 1045.

Tabela 7 – Composição química da amostra aço SAE 1045.

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Ni%	Cr%	Mo%	Cu%
0,45175	0,17454	0,67728	0,00893	0,00553	0,01139	0,01474	0,00168	0,00251
Co%	Al%	Pb%	W%	Ti%	V%	B%	Nb%	Fe%
0,00407	0,08140	---	---	0,00292	0,00468	0,00052	0,00085	98,557

Através dos resultados encontrados de composição química, foi calculado o carbono equivalente (CE), utilizando a equação recomendada pela AWS D1.1 (2000), seguindo a Equação 1:

$$CE = C + \frac{(Mn + Si)}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} \quad (1)$$

O CE calculado para a amostra do aço SAE 1045 é igual a 0,59. A microestrutura encontrada na Figura 14, para a caracterização do aço base SAE 1045, é composta de ferrita e perlita. A dureza média do material base encontrada é de 188 HB “*Hardness Brinell*”, aproximadamente 10 HRC “*Hardness Rockwell C*”.

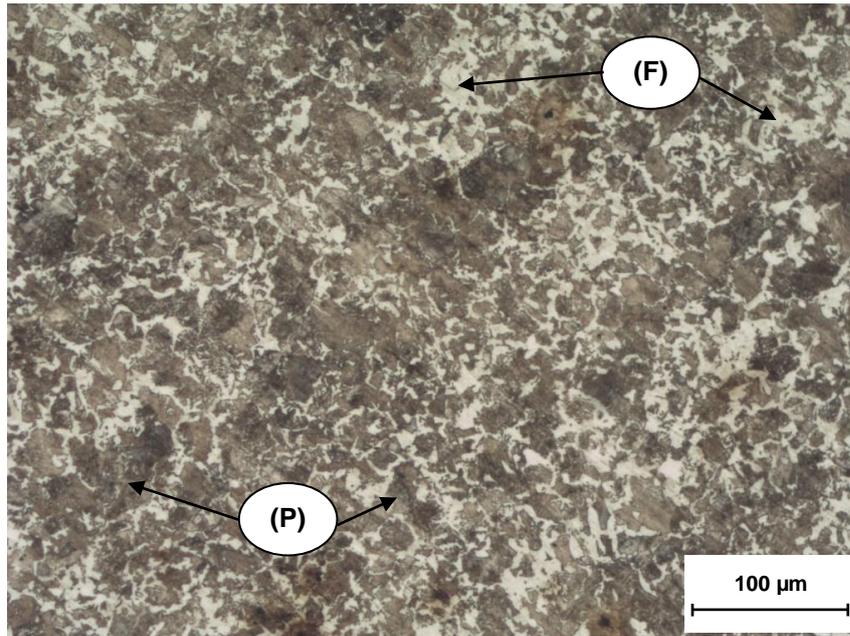


Figura 14: Microestrutura do aço 1045. Atacada com Nital 3,5%. Ampliação 100X. (F) Ferrita;(P) Perlita.

Todos os corpos de prova soldados com o aço carbono SAE 1045 sofreram alteração na microestrutura, indiferente dos níveis de energia média selecionados para a soldagem experimental.

O valor de 0,59 para o carbono equivalente do aço SAE 1045, quando submetido a soldagem por descarga capacitiva, considerando a alta velocidade e alta taxa de resfriamento na região soldada, esses fatores geram uma tendência de junta soldada frágil e sujeita a falhas internas de trincas nesta região. A fragilidade da junta soldada é devido à formação do microconstituente martensita na região afetada pelo calor da solda.

As fases formadas nas amostras soldadas com o aço SAE 1045, podem ser visualizadas nas Figuras 15 e 16.

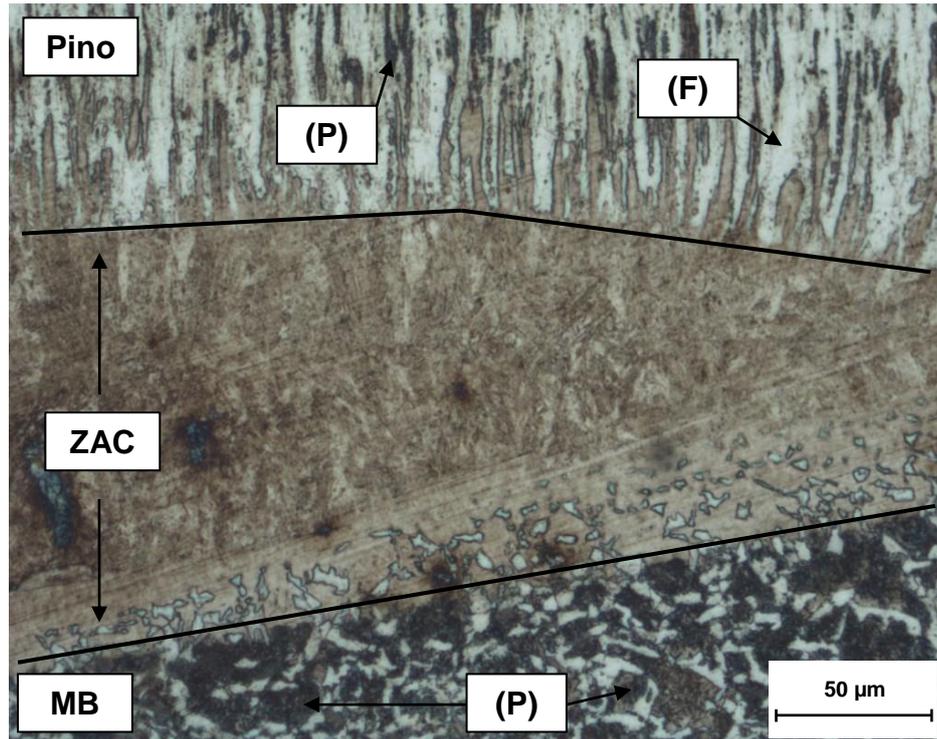


Figura 15: Micrografia das amostras do aço 1045, mostrando a microestrutura do Material Base (MB), da Zona Afetada pelo Calor (ZAC) e microestrutura do Pino. Ferrita (F) e Perlita (P). Atacada com Nital 3,5%. Ampliação 200X.

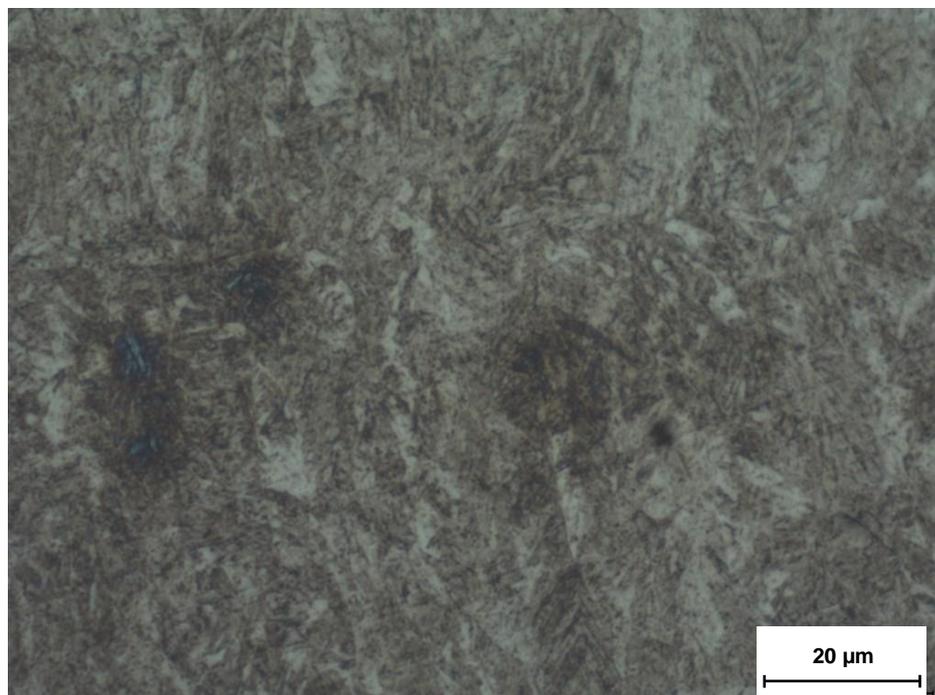


Figura 16: Micrografia da amostra do aço 1045, mostrando a microestrutura da Zona Afetada pelo Calor (ZAC) formada por Martensita (M). Atacada com Nital 3,5%. Ampliação 500x.

A microestrutura do pino inalterado pelo calor da solda, utilizado na soldagem dos corpos de prova é constituída por ferrita (F) e perlita (P), com

predominância de ferrita devido ao baixo teor de carbono deste material. A ferrita é o microconstituente com menor nível de dureza. A microestrutura do MB inalterado pelo calor já foi caracterizada e continua formada por ferrita e perlita, com proporções aproximadas de 50% de cada constituinte.

A ZAC apresenta características típicas e esperadas por este processo de soldagem, a microestrutura é composta de martensita (M). A martensita, na imagem da microestrutura na Figura 16, possui aparência de “agulhas” e a alta dureza verificada. As características microestruturais obtidas são equivalentes para as amostras dos 6 níveis de energia média de soldagem.

Os resultados encontrados para a microdureza das amostras soldadas com diferentes níveis de energia média, podem ser visualizados através de um perfil de microdureza mostrado na Figura 17.

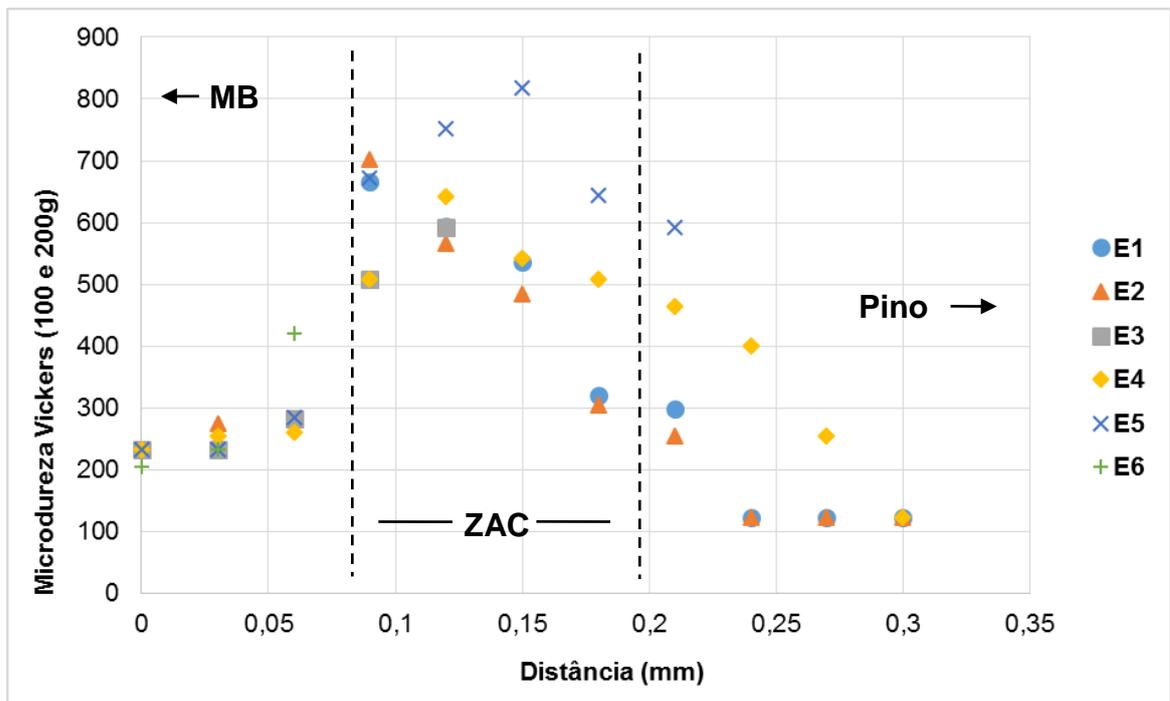


Figura 17: Perfil de microdureza das amostras do aço 1045 soldadas com os 6 níveis de energia média e endentações separadas com 0,03 mm.

As amostras ensaiadas para o aço SAE 1045, apresentaram valores elevados de microdureza na ZAC, o teor de carbono encontrado de 0,45% colabora para este fato. A microdureza no MB e no Pino, em posições inalteradas pelo calor da solda, varia de 100 a 250 HV, resultado da microestrutura ferrítica destes aços.

Os valores de microdureza situados na região da ZAC, são típicos da microestrutura martensítica formada na solda dos corpos de prova. A energia média E5, atingiu maior valor na ZAC chegando a 817,5 HV (64 HRC), de modo geral todas

as energias médias atingiram valores superiores a 500 HV na ZAC. Em relação a extensão da ZAC formada entre o MB e o material do pino, nas amostras em que a solda uniu o pino com o MB, foi alcançado em média 0,10 mm e nas amostras onde o pino soltou-se, a ZAC ficou em média com 0,05 mm. As endentações de microdureza sobre o MB do aço 1045 até pino, podem ser visualizadas na Figura 18.

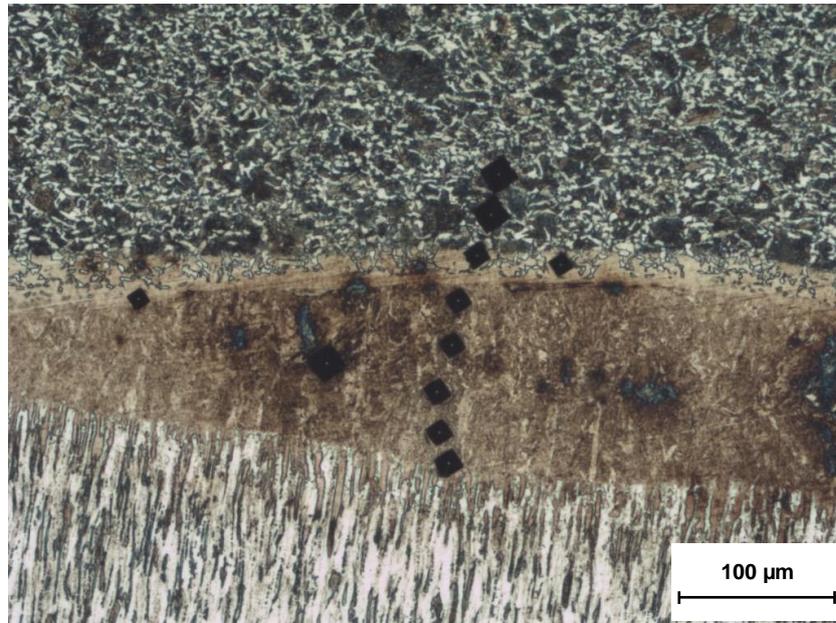


Figura 18: Micrografia mostrando as endentações do ensaio de microdureza de uma das amostras. Atacada com Nital 3,5%. Ampliação 100X.

4.2 CARACTERIZAÇÃO AÇO DOMEX 700MC

Os resultados de composição química encontrados para a amostra do aço DOMEX 700MC estão de acordo com os limites normatizados pelo fabricante SSAB e por norma DIN EN 10149-2 de material similar. Quando comparado ao aço 1045, evidencia-se o baixo teor de carbono encontrado neste material. Os valores encontrados para a composição química da amostra do aço DOMEX 700MC podem ser visualizados na Tabela 8.

Tabela 8 – Composição química da amostra aço DOMEX 70MC.

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Ni%	Cr%	Mo%	Cu%
0,03503	0,04728	1,8253	0,00808	0,00389	0,03739	0,04633	0,00568	0,01194
Co%	Al%	Pb%	W%	Ti%	V%	B%	Nb%	Fe%
0,02146	0,05283	---	---	0,10275	0,02962	0,00074	0,06096	97,711

Utilizando a Equação 1 para o cálculo do carbono equivalente para a amostra analisada do aço DOMEX 700MC, o resultado encontrado é de aproximadamente 0,37, resultado inferior ao valor do CE para a amostra do aço SAE 1045.

A microestrutura encontrada no aço base DOMEX 700MC é típica do material com baixa liga de alta resistência mecânica, com baixo teor de carbono e elevado teor de manganês. Microestrutura formada por ferrita, perlita e martensita. A dureza média é de 30 HRC, valor relativamente alto quando comparado ao aço carbono 1045. Na Figura 19 é mostrado a microestrutura do material base DOMEX 700MC.

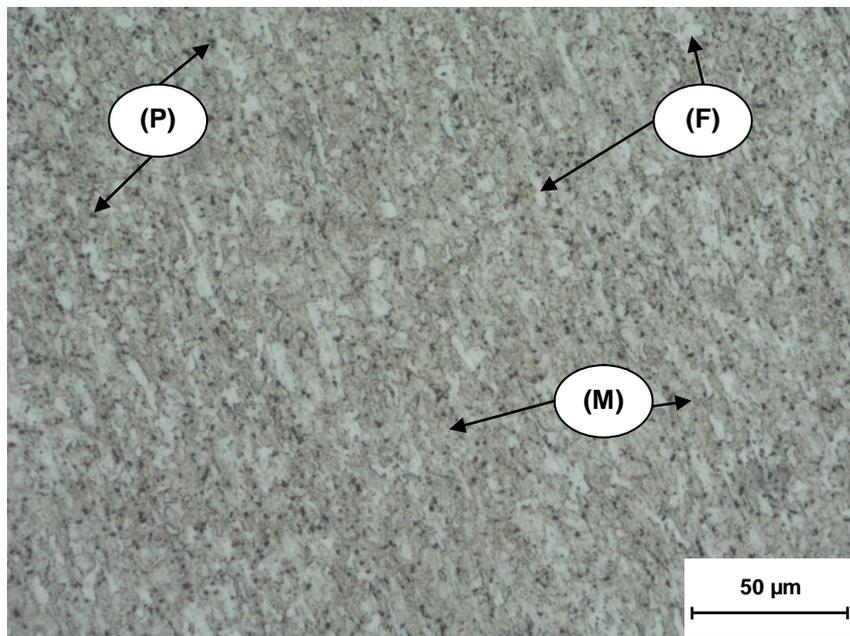


Figura 29: Microestrutura do aço DOMEX 700MC. Atacada com Nital 3,5%. Ampliação 200X. (F) Ferrita; (P) Perlita; (M) Martensita.

Um fato observado nos resultados das amostras soldadas pelo processo de descarga capacitiva unindo o pino com o MB, é que houve a formação de uma Zona de Fusão de Solda (ZF) menor do que a ZAC, porém as duas zonas possuem extensão que varia de centésimos a décimos de milímetros. As fases formadas nas amostras soldadas do aço base DOMEX 700MC, podem ser visualizadas nas Figuras 20 e 21.

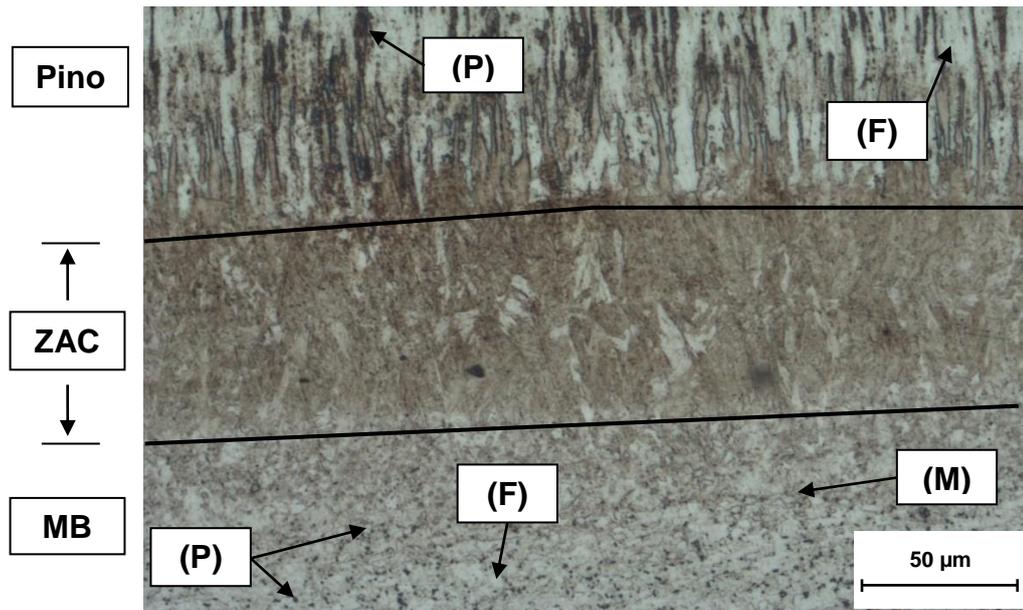


Figura 20: Micrografia da amostra do aço DOMEX 700MC, mostrando a microestrutura do Material Base (MB), da Zona Afetada pelo Calor (ZAC) e microestrutura do Pino. Ferrita (F), Perlita (P) e Martensita (M). Atacada com Nital 3,5%. Ampliação 200X.

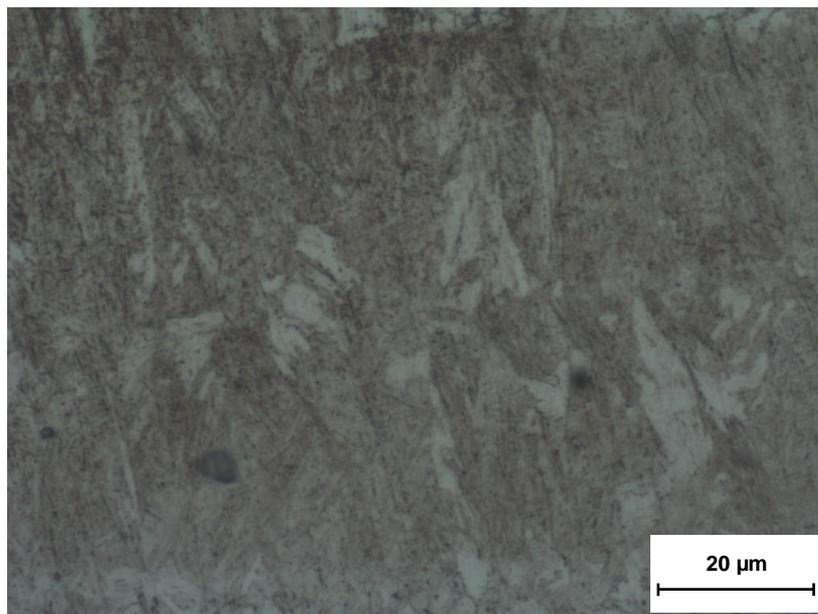


Figura 21: Micrografia da amostra do aço DOMEX 700MC, mostrando a microestrutura da Zona Afetada pelo Calor (ZAC) formada por Martensita (M). Atacada com Nital 3,5%. Ampliação 500x.

A microestrutura do Pino inalterado pelo calor da solda continua a mesma, constituída por matriz de ferrita (F) e sítios de perlita (P). A microestrutura do MB, inalterado pelo calor, é típica do aço com baixa liga e baixo teor de carbono, formada por ferrita, perlita e martensita (M).

A alta temperatura liberada pelo processo, alinhado a aplicação rápida de tempo na ordem dos milissegundos, são contribuintes para a formação da martensita na faixa da ZAC, isso para todas as energias médias selecionadas.

O material base DOMEX 700MC possui elementos de liga em baixo nível, provocando formação de perlita em estruturas com teor baixo encontrado para o carbono de 0,035%, isso significa uma tenacidade maior comparada ao aço carbono. Quando aplicado o processo de soldagem capacitiva para este MB, tem a formação de martensita, porém menos frágil e mais tenaz, com menor valor de microdureza, fatores que também estão interligados com o menor valor do carbono equivalente encontrado para o DOMEX 700MC, quando comparado ao aço 1045.

Os resultados encontrados para a microdureza das amostras soldadas com diferentes níveis de energia média de soldagem, podem ser visualizados na Figura 22, a qual mostra o perfil de microdureza em função da distância.

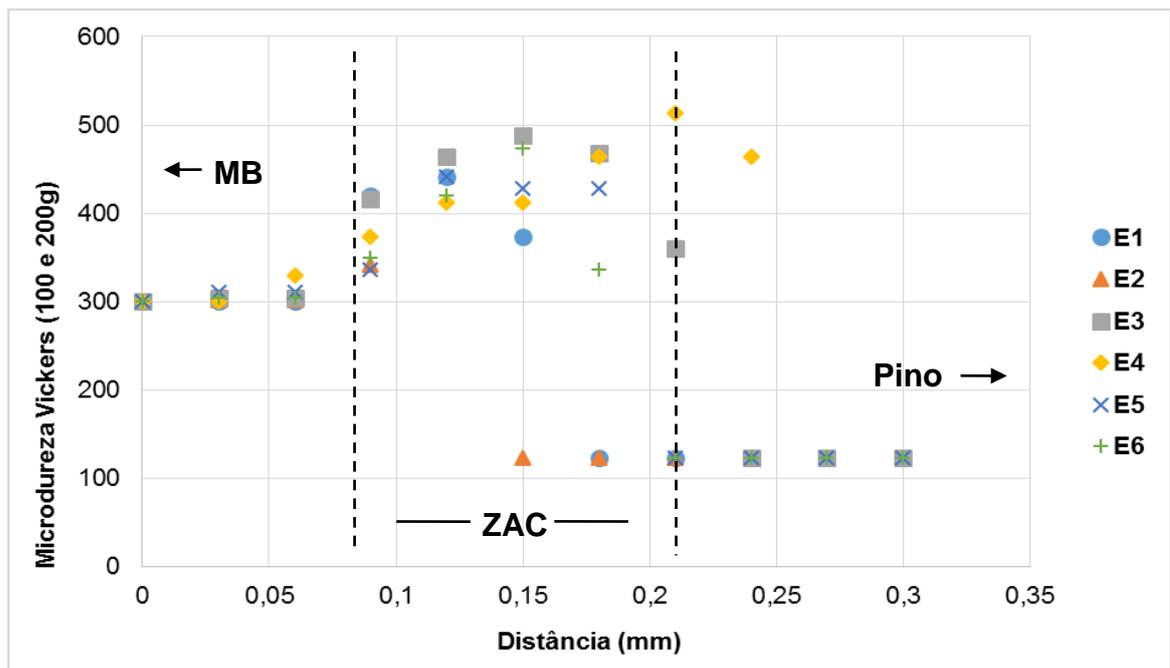


Figura 22: Perfil de microdureza das amostras do aço DOMEX 700MC soldadas com os 6 níveis de energia média e endentações separadas com 0,03 mm.

Percebe-se que, para os seis níveis de energia média, houve um aumento da microdureza na região martensítica da ZAC. Porém, é relevante que o nível de microdureza encontrado na ZAC das amostras do DOMEX 700MC é inferior ao nível de microdureza do aço 1045 na formação da ZAC, relacionado a funcionalidade da solda, menor valor de microdureza, pode ser considerado positivo se este conjunto for submetido a esforços dinâmicos. O menor nível de microdureza tende a baixa

porcentagem de carbono, ao carbono equivalente e aos elementos de liga do aço DOMEX 700MC, com níveis mais controlados de dureza diminui-se a fragilidade da junta soldada.

As energias médias E3 e E4 atingiram os maiores valores de microdureza na ZAC, respectivamente, 487,7 HV (48 HRC) e 513,7 HV (50 HRC), em geral todas as energias médias de soldagem atingiram valores superiores a 400 HV na ZAC. Em relação a extensão da ZAC formada entre o MB e o material do pino, as energias médias E3 e E4 atingiram maior extensão. Nas amostras em que a solda uniu o pino com o MB, foi alcançado em média 0,16 mm e nas amostras onde o pino soltou-se, a ZAC ficou em média com 0,05 mm. As endentações de microdureza sobre o MB do aço DOMEX 700MC até pino, podem ser visualizadas na Figura 23.



Figura 23: Micrografia mostrando as endentações do ensaio de microdureza de uma das amostras. Atacada com Nital 3,5%. Ampliação 100X.

4.3 CARACTERIZAÇÃO AÇO DOCOL DP 1000

Os resultados de composição química encontrados para a amostra do aço DOCOL DP 1000 estão de acordo com os limites especificados pelo fabricante SSAB. A amostra apresenta um nível baixo de carbono e de outros elementos de liga. Na Tabela 9, está apresentado os valores encontrados para a composição química da amostra do aço DOCOL DP 1000.

Tabela 9 – Composição química da amostra aço DOCOL DP 1000.

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Ni%	Cr%	Mo%	Cu%
0,12752	0,52055	1,4517	0,00794	0,00451	0,03673	0,03156	0,00568	0,01956
Co%	Al%	Pb%	W%	Ti%	V%	B%	Nb%	Fe%
0,02892	0,07760	---	---	0,00605	0,01957	0,00065	0,02624	97,635

A partir dos resultados encontrados para a composição química e utilizando para o cálculo a Equação 1, o valor do carbono equivalente para a amostra do aço DOCOL DP 1000 é de aproximadamente 0,47.

A microestrutura encontrada para a amostra do material base DOCOL DP 1000 é constituída principalmente de ferrita e martensita, típico de materiais com microestrutura bifásica. A dureza média encontrada no MB é de 34 HRC, valor relativamente alto, porém justificado pela presença de martensita no MB. A microestrutura do aço DOCOL DP 1000 pode ser visualizada na Figura 24.

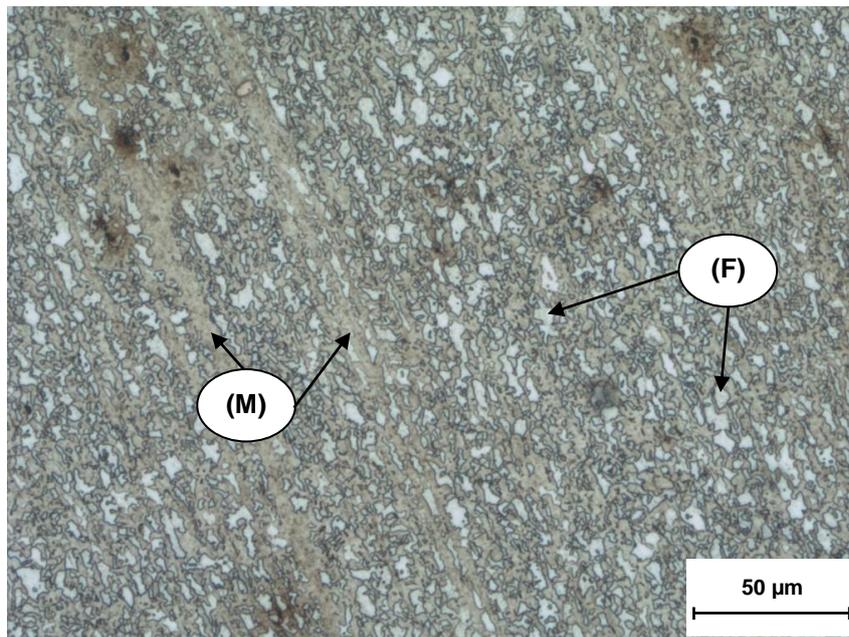


Figura 24: Microestrutura aço DOCOL DP 1000. Atacada com Nital 3,5%. Ampliação 200X. (F) Ferrita; (M) Martensita.

A apresentação das fases formadas nas amostras soldadas com o aço base DOCOL DP 1000, com os seis diferentes níveis de energia média de soldagem, podem ser visualizadas nas Figuras 25 e 26.

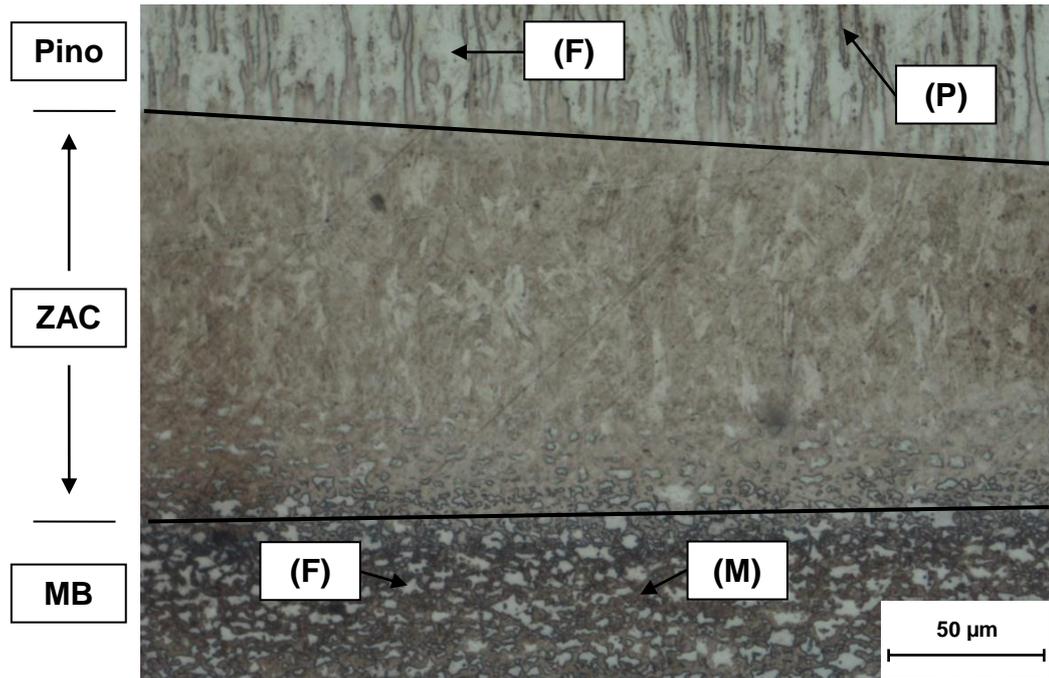


Figura 25: Micrografia da amostra do aço DOCOL DP 1000, mostrando a microestrutura do Material Base (MB), da Zona Afetada pelo Calor (ZAC) e microestrutura do Pino. Ferrita (F), Perlita (P) e Martensita (M). Atacada com Nital 3,5%. Ampliação 200X.

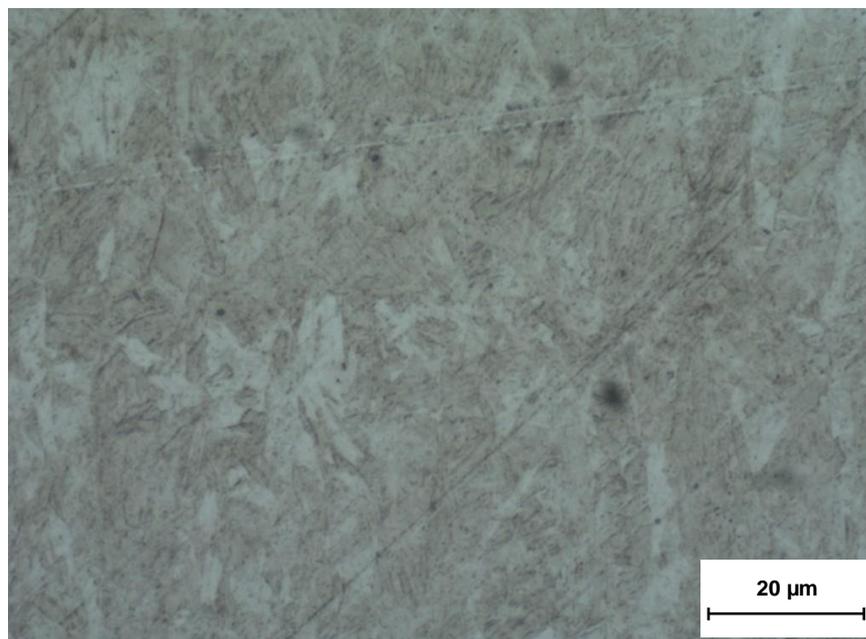


Figura 26: Micrografia da amostra do aço DOCOL DP 1000, mostrando a microestrutura da Zona Afetada pelo Calor (ZAC) formada por Martensita (M). Atacada com Nital 3,5%. Ampliação 500x.

Na região inalterada pelo calor no pino, a microestrutura continua formada por ferrita (F) e perlita (P). A microestrutura no MB inalterado pelo calor, já caracterizada, é constituída por ferrita e martensita (M). Na região da ZAC, formada pelo processo de soldagem por descarga capacitiva, para as seis energias médias

de soldagem a microestrutura é constituída de martensita, o valor de 0,47 para o carbono equivalente, por ser um valor considerado elevado, também é um fator contributivo para a formação de martensita.

Os materiais DOCOL DP 1000 e o DOMEX 700MC são aços microligados, o aço DOCOL DP 1000 apresenta uma microestrutura do material base com maior nível de martensita e teor de carbono comparado ao DOMEX 700MC, ocasionando, assim, maior valor de dureza e resistência a tração para o MB DOCOL DP 1000.

Já as características encontradas na ZAC para o aço DOCOL DP 1000 e para o aço DOMEX 700MC são similares, não há um aumento de microdureza na ZAC do aço DOCOL DP 1000 em relação ao DOMEX 700MC, e os dois aços formam martensita.

Os resultados encontrados para a microdureza das amostras soldadas com diferentes níveis de energia média do aço DOCOL DP 1000, podem ser visualizados através da Figura 27.

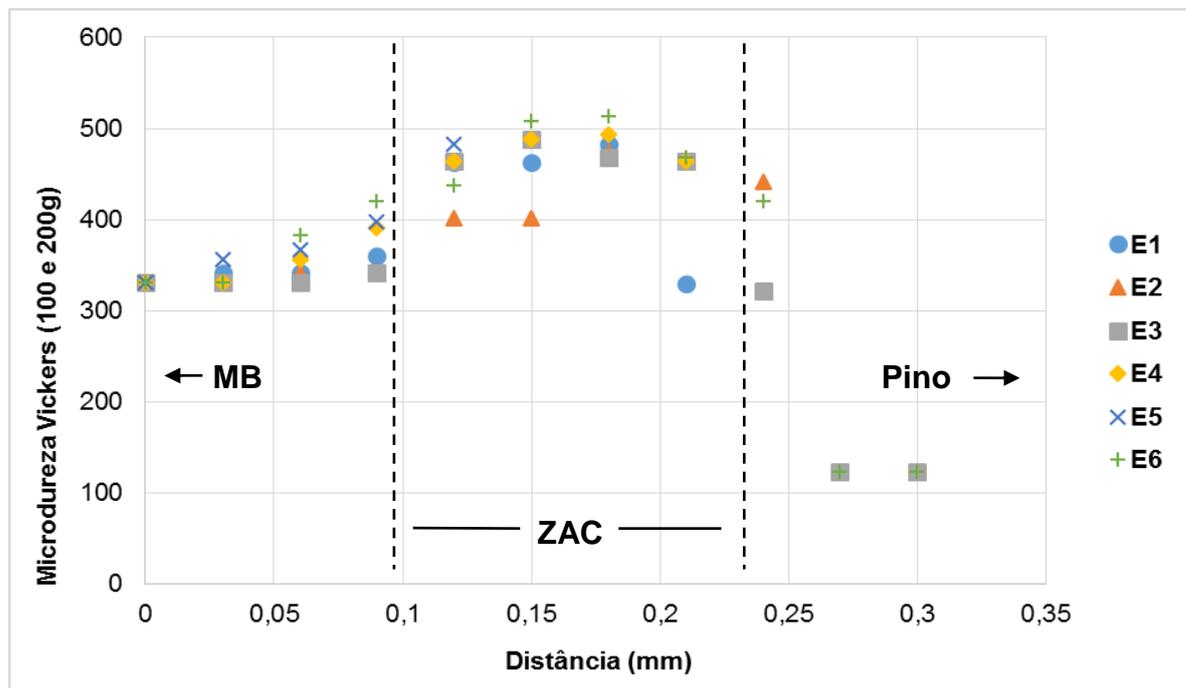


Figura 27: Perfil de microdureza das amostras do aço DOCOL DP 1000 soldadas com os 6 níveis de energia média e endentações separadas com 0,03 mm.

A microdureza do MB onde não foi afetado pelo calor da solda é de 340,9 HV (34 HRC), e a microdureza no pino, também na região inalterada, é de 120 HV próximo de 10 HRC. A dureza do MB DOCOL DP 1000, é a maior comparada aos aços 1045 e DOMEX 700MC.

Para os seis níveis de energia média, houve um aumento da microdureza na região martensítica da ZAC formada pelo processo de solda capacitiva. O nível de microdureza encontrado na ZAC das amostras do DOCOL DP 1000 é inferior ao nível de microdureza do aço 1045 e similar ao aço DOMEX 700MC.

Em geral, para as seis energias médias aplicadas nos testes de soldagem houve um aumento da microdureza na região da ZAC, valores superiores 400 HV. A energia média E6 atingiu maior valor de microdureza na ZAC, com 513,7 HV (50 HRC). Há uma variação da extensão da ZAC formada entre o MB e o pino, nas amostras em que a solda uniu o pino com o MB, foi alcançado em média 0,14 mm, já nas amostras onde o pino soltou-se do MB, a ZAC ficou em média com 0,06 mm, a energia média E5 teve a menor extensão e a E6 teve a maior extensão.

As endentações de microdureza sobre o MB do aço DOCOL DP 1000 até pino, podem ser visualizadas na Figura 28.

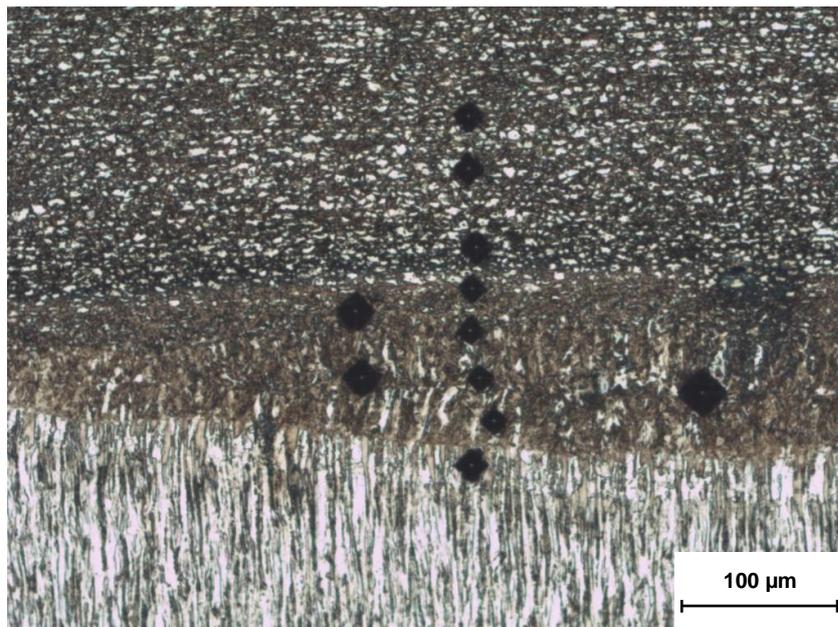


Figura 28: Micrografia mostrando as endentações do ensaio de microdureza de uma das amostras. Atacada com Nital 3,5%. Ampliação 100X.

Se os conjuntos soldados pelo processo de soldagem por descarga capacitiva estarão submetidos a esforços dinâmicos, não recomenda-se utilizar aços com valor do carbono equivalente acima de 0,30 ou aços com dureza acima de 28 HRC, pois, a microestrutura da ZAC será martensítica e a microdureza de valor elevado, contribuindo para futuras trincas e falhas na junta soldada. Nota-se o menor nível de microdureza na ZAC dos aços DOMEX 700MC e DOCOL DP 1000 para todas as energias médias de soldagem, comparado ao aço SAE 1045.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram caracterizados três diferentes aços soldados através do processo de soldagem por descarga capacitiva. O efeito da aplicação de seis níveis de energia média de soldagem foi analisado para os aços SAE 1045, DOMEX 700MC e DOCOL DP 1000.

A partir dos resultados e discussões apresentados, pode-se concluir o seguinte:

- O processo de soldagem por descarga capacitiva gera uma ZAC de curta extensão, com dimensão que varia de centésimos a décimos de milímetro. Nos corpos de prova soldados a extensão variou de 0,05 mm até 0,16 mm, isto, para diferentes energias e tipos de aços.
- O processo de soldagem por descarga capacitiva aplicado na soldagem dos corpos de prova ocasionou a evolução microestrutural na região da ZAC, isto é, formou martensita.
- A alta taxa de resfriamento da região soldada somados as características dos aços SAE 1045, DOMEX 700MC e DOCOL DP 1000, onde os três aços apresentaram valores elevados do carbono equivalente, colaboraram para a formação de microestrutura martensítica na ZAC de todos os corpos de prova soldados.
- Verifica-se o considerável aumento da microdureza na região da ZAC utilizando o processo de soldagem por descarga capacitiva para os aços SAE 1045, DOMEX 700MC e DOCOL DP 1000.
- Foi evidenciado uma pequena variação dos valores encontrados de microdureza na região da ZAC, relacionado com o aumento das energias médias propostas para a soldagem das amostras.
- Os valores de microdureza encontrados na ZAC das amostras do aço ao carbono SAE 1045 é mais elevado que nas amostras do DOMEX 700MC e DOCOL DP 1000.
- Quanto maior o valor do carbono equivalente nos aços submetidos ao processo de soldagem por descarga capacitiva, maior é o valor da microdureza na ZAC.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se o seguinte:

- Determinar as taxas de resfriamento através de modelos matemáticos;
- Realizar soldagem por descarga capacitiva de materiais dissimilares;
- Realizar um estudo computacional das fases formadas através do processo de soldagem por descarga capacitiva;
- Realizar ensaios mecânicos (tração) nos corpos de provas soldados através do processo de soldagem por descarga capacitiva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. ANSI/AWS C5.4. **Recommended Practices for Stud Welding**. Miami, Florida – USA, 1993.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. ANSI/AWS D1.1/D1.1M. **Structural Welding Code – Steel**. Miami, Florida – USA, 2000.

BECK, Mauri. **Desenvolvimento de um Dispositivo para Soldagem Capacitiva**. 2014. Monografia (Bacharel em Engenharia Mecânica) – FAHOR, Horizontina, 2014.

BRANDI, D. S; MELLO, F. D. H. de; WAINER, E. **Soldagem Processos e Metalurgia**. 4ª impressão. São Paulo: Blucher, 2004.

CALLISTER, Willian D. Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 5. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais. 1982.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 6ª impressão. São Paulo: Blucher, 2000.

DIN EN 10149-2: **Hot rolled flat products made of high yield strength steels for cold forming**. Part 2: Technical delivery conditions for thermomechanically rolled steels. [S.l.], 2013.

ENTRON. **Resistance Welding**. 1998. Disponível em: <http://www.spotweldingconsultants.com/welding_basics_english.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2015.

FUSION SOLUTIONS. **Capacitor discharge welding technical data**. 2001. Disponível em: <http://cdfusion.com/doc/CDFS_White_Paper.PDF>. Acesso em: 19 abr. 2015.

GIMENES, L. Jr.; TREMONTI, M. A. **Soldagem de Pinos**. 1995. Disponível em: <<http://www.asmtreinamentos.com.br/asm/downloads/solador/arquivo71.pdf>>. Acesso em: 3 set. 2015.

KOU, Sindo. **Welding Metallurgy**. 2. ed. Hoboken, New Jersey – USA: John Wiley & Sons, Inc, 2003.

MACHADO, I. G. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**. Porto Alegre: [s.n.], 1996.

MARQUES, P. V; MODENESI, P. J; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2011.

MARTINS, Marcelo. **Temperabilidade Jominy e Influência do Revenido Sobre a Dureza – Um Estudo em Aços Estruturais Nacionais**. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais / Curso de Pós-Graduação em Ciências dos Materiais) – Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade dos Aços Transformáveis**. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Minas – UFMG. Belo Horizonte, 2002. Disponível em:

<<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metferritic1.pdf>>. Acesso em 7 set. 2015.

ROCHA, I. C. L. **Propriedades mecânico/metalúrgicas de juntas soldadas de DP1000 e o efeito de bake hardening**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia / Processos de Fabricação) – DEMEC/PPGE3M – UFRGS, Porto Alegre, 2014.

RODRIGUES, S. M. **Estudo do comportamento em fadiga de juntas soldadas de aços bifásicos de alta resistência mecânica**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia / Ciências dos Materiais) – DEMEC/PPGE3M – UFRGS, Porto Alegre, 2012.

SURFACE VEHICLE STANDARD. SAE J403: **Chemical compositions of SAE carbon steels**. [S.I.], 2009.

SURFACE VEHICLE STANDARD. SAE J1397: **Estimated mechanical properties and machinability of steel bars**. [S.I.], 1992.

SSAB – **Docol DP/DL Cold reduced dual phases steels**. SSAB Swedish Steel, 2014. Disponível em: <<http://www.ssab.com/en/Brands/Docol1/Products/Docol-1000-DP/>>. Acesso em: 28 abr. 2015.

SSAB – **Domex 700 MC Hot rolled, extra high strength, cold forming steel**. SSAB Swedish Steel, 2003. Disponível em: <<http://www.ssab.com/en/Brands/Domex/Products/Domex-700-MC/>>. Acesso em: 25 abr. 2015.

TRU-WELD. **Capacitor Discharge Stud Welding Booklet**. 2013. Disponível em: <<http://www.truweldstudwelding.com/CDStudBooklet.pdf>>. Acesso em: 23 abr. 2015.

VERÁSTEGUI, R. N. **Análise da Refusão Superficial de Aços por Laser com Altas Taxas de Resfriamento**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia / Processos de Fabricação) – DEMEC/PPGEM – UFRGS, Porto Alegre, 2007.