

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

ENGENHARIA MECÂNICA

NELSON DE ASSIS CAETANO JUNIOR

**EFEITOS DA GEOMETRIA DE FACES NA SOLDAGEM POR FRICÇÃO
ENTRE AÇOS DISSIMILARES SAE 1020 E SAE 1045**

Ilha solteira - SP
2025

NELSON DE ASSIS CAETANO JUNIOR

**EFEITOS DA GEOMETRIA DE FACES NA SOLDAGEM POR FRICÇÃO
ENTRE AÇOS DISSIMILARES SAE 1020 E SAE 1045**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Departamento de Materiais
e Processos de fabricação como requisito à
conclusão de curso em Bacharelado em
Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Processos de
Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. José Gedael
Fagundes Júnior

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- C128e Caetano Junior, Nelson de Assis.
Efeitos da geometria de faces na soldagem por fricção entre aços dissimilares SAE 1020 e SAE 1045 / Nelson de Assis Caetano Junior. -
- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
70 f. : il.
- Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2025
- Orientador: José Gedael Fagundes Júnior
- Inclui bibliografia
1. Soldagem por fricção. 2. Geometria de interface. 3. Metais dissimilares.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "Júlio de Mesquita Filho"
FACULDADE DE ENGENHARIA – CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ATA DA DEFESA TRABALHO DE GRADUAÇÃO

TÍTULO: EFEITOS DA GEOMETRIA DE FACES NA SOLDAGEM POR FRICÇÃO
ENTRE AÇOS DISSIMILARES SAE 1020 E SAE 1045

ALUNO: Nelson de Assis Caetano Junior

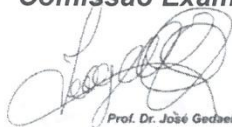
RA:

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSÉ GEDAEI FAGUNDES JÚNIOR

Aprovado (X) - Reprovado () pela Comissão Examinadora

Nota: 9,8

Comissão Examinadora:



Prof. Dr. José Gedael Fagundes Jr.
Professor Doutor Assistente
Dep'to: Engenharia Mecânica
FEIS/UNESP - Matr.: 452186-9

Prof. Dr. José Gedael Fagundes Júnior
Presidente (Orientador)

Documento assinado digitalmente

gov.br

VICENTE AFONSO VENTRELLA
Data: 27/06/2025 16:56:21-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Vicente Afonso Ventrella

Documento assinado digitalmente

gov.br

BRUNO ALVES DE ANDRADE
Data: 30/06/2025 10:57:49-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Bruno Alves de Andrade



Nelson de Assis Caetano Junior

Ilha Solteira, 26 de junho de 2025.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho representa a concretização de uma etapa importante da minha trajetória acadêmica, e seria impossível alcançá-la sem o apoio e a contribuição de pessoas especiais, às quais sou profundamente grato.

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder saúde, força e perseverança ao longo desta caminhada.

Ao meu orientador, Geadel Fagundes, registro minha sincera gratidão pela orientação precisa, pela paciência nos momentos de dificuldade e pela confiança em meu potencial. Sua dedicação e conhecimento foram fundamentais para a condução deste trabalho.

Aos professores do curso de Engenharia, agradeço pelo conhecimento transmitido, pelo incentivo ao pensamento crítico e pelo exemplo profissional que levarei comigo.

Aos técnicos de laboratório, em especial Diego de Alcântara e Bruno Alves de Andrade, agradeço pela ajuda prática nos experimentos e pelo apoio constante ao desenvolvimento do trabalho. Bem como ao docente Vicente Afonso Ventrella que possibilitou a realização deste trabalho ao emprestar o torno de bancada.

Aos colegas de curso e amigos, Umberto Boranga, Arthur Chabole, João Paulo Costa, Cleiton Pereira, Elias Amaral, Emilly Andrade, Matheus Barbosa dentre vários outros que estiveram presentes e com quem compartilhei aprendizados, desafios e conquistas ao longo destes anos, deixo meu reconhecimento e amizade. Deixo meu profundo agradecimento à República CC por me apoiar nos meus desafios e momentos difíceis.

Aos meus pais, Nelson de Assis Caetano e Vilma Maria de Paiva e meu irmão, Gustavo de Paiva Caetano, que sempre acreditaram em mim, mesmo nos momentos mais difíceis, minha eterna gratidão pelo amor incondicional, apoio emocional e incentivo nos estudos.

Agradeço, também o Departamento de Física e Química que possibilitou a análise com o microdurômetro e tornou o trabalho mais detalhado e completo.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. Cada gesto, conselho ou palavra de apoio foi essencial para que esta etapa fosse superada com sucesso.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo investigar a viabilidade e o comportamento metalúrgico e mecânico da soldagem por fricção convencional entre os aços SAE 1020 e SAE 1045, com foco na influência da geometria das superfícies de contato na qualidade da união. O processo foi conduzido em um torno mecânico adaptado, equipado com célula de carga para monitoramento em tempo real das forças aplicadas durante o ciclo de soldagem. Corpos de prova com pontas planas e cônicas foram usinados e soldados, sendo posteriormente avaliados por meio de ensaios de microdureza Vickers, tração e análises microestruturais por microscopia óptica. Os resultados demonstraram que a geometria das pontas exerce influência significativa na qualidade da junta. As amostras com pontas planas apresentaram maior resistência à tração, menor deformação axial e uma interface de ligação mais homogênea, com menor formação de rebarbas e zona termicamente afetada mais estável. A distribuição de dureza ao longo da interface revelou alterações esperadas para os diferentes materiais, com queda na dureza do aço SAE 1020 devido à maior deformação plástica e elevação moderada no SAE 1045, associada ao encruamento. A caracterização microestrutural evidenciou boa coesão na interface, com linhas de fluxo e refino de grão típicos de soldagens em estado sólido. O estudo confirmou a eficácia da soldagem por fricção entre metais dissimilares com diferentes resistências mecânicas, mesmo utilizando equipamentos convencionais. Os resultados obtidos reforçam o potencial do processo como alternativa viável, econômica e segura para aplicações estruturais que exigem união entre materiais com propriedades distintas.

Palavras-chave: soldagem por fricção, geometria de interface, metais dissimilares.

ABSTRACT

This study aimed to investigate the feasibility and the metallurgical and mechanical behavior of conventional friction welding between SAE 1020 and SAE 1045 steels, focusing on the influence of contact surface geometry on joint quality. The process was carried out using an adapted engine lathe, equipped with a load cell for real-time monitoring of the forces applied during the welding cycle. Specimens with flat and conical ends were machined and welded under different conditions, and later evaluated through Vickers microhardness tests, tensile tests, and microstructural analysis via optical microscopy. The results showed that tip geometry significantly influences joint performance. Samples with flat ends exhibited higher tensile strength, less axial deformation, and a more homogeneous bonding interface, with reduced burr formation and a more stable heat-affected zone. The hardness distribution along the interface revealed the expected material behavior, with a decrease in hardness for SAE 1020 due to greater plastic deformation, and a moderate increase for SAE 1045, associated with work hardening. Microstructural characterization confirmed good cohesion at the interface, with flow lines and grain refinement typical of solid-state welding. The study confirmed the effectiveness of friction welding for joining dissimilar metals with different mechanical strengths, even when using conventional equipment. The results highlight the potential of the process as a viable, cost-effective, and safe alternative for structural applications requiring the joining of materials with distinct properties.

Keywords: friction welding, interface geometry, dissimilar metals.

LISTA DE NOMENCLATURA

SAE	Society of Automotive Engineers
ZTA	Zona Termicamente Afetada
IL	Interface de Ligação
HV	Dureza Vickers
rpm	Rotações por minuto
MPa	Megapascal
W	Potência (Watt)
ω	Velocidade angular (rad/s)
T	Torque (N·m)
μ	Coefficiente de atrito
P	Pressão (Pa)
°C	Graus Celsius
mm	Milímetro
Nital 2%	Solução de ácido nítrico em etanol
ASM	American Society for Metals

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução microestrutural no resfriamento de aços hipoeutetóides.....	17
Figura 2 – Diagrama TTT de aços hipoeutetóides.....	18
Figura 3 – Equipamento de soldagem por fricção de arraste contínuo.....	21
Figura 4 – Etapas da soldagem por fricção.....	22
Figura 5 – Variação dos parâmetros X tempo para a soldagem por fricção convencional...	23
Figura 6 – Influência da velocidade de soldagem no tempo de aquecimento das peças à pressão constante	25
Figura 7 – Influência da pressão de soldagem no tempo de aquecimento à velocidade de rotação constante	26
Figura 8 – Refinamento de grão na morfologia da solda.....	28
Figura 9 – Influência dos parâmetros de soldagem na morfologia da solda	28
Figura 10 – Desenho esquemático simplificado das partes de um torno mecânico adaptado à solda por atrito	32
Figura 11 – Maquinário utilizado para realização das soldas	33
Figura 12 – Célula de carga	33
Figura 13 – Corpos de prova com as pontas usinadas	34
Figura 14 – Estereoscópio	37
Figura 15 – Microscópio óptico	37
Figura 16 – Microdurômetro	38
Figura 17 – Macrografia do perfil de microdureza Vickers	39
Figura 18 – Máquina de ensaio de tração	39
Figura 19 – Microestrutura da liga SAE 1045	40
Figura 20 – Microestrutura da liga SAE 1020	41
Figura 21 – Monitoramento da tensão para uma das soldas	41
Figura 22 – Gráfico da força no tempo para solda C1	42
Figura 23 – Gráfico da força no tempo para solda C2	42
Figura 24 – Gráfico da força no tempo para solda C3	43
Figura 25 – Gráfico da força no tempo para solda C4	43
Figura 26 – Gráfico da força no tempo para solda C5	44
Figura 27 – Gráfico da força no tempo para solda P1	44
Figura 28 – Gráfico da força no tempo para solda P2	44
Figura 29 – Gráfico da força no tempo para solda P3	45
Figura 30 – Gráfico da força no tempo para solda P4	45
Figura 31 – Gráfico da força no tempo para solda P5	45
Figura 32 – Corpos de prova soldados de ponta cônica C1	46
Figura 33 – Corpos de prova soldados de ponta cônica C2	46
Figura 34 – Corpos de prova soldados de ponta cônica C3	46
Figura 35 – Corpos de prova soldados de ponta cônica C4	46
Figura 36 – Corpos de prova soldados de ponta cônica C5	46
Figura 37 – Corpos de prova soldados de ponta plana P1	46
Figura 38 – Corpos de prova soldados de ponta plana P2	47
Figura 39 – Corpos de prova soldados de ponta plana P3	47
Figura 40 – Corpos de prova soldados de ponta plana P4	47
Figura 41 – Corpos de prova soldados de ponta plana P5	47
Figura 42 – Fotomicrografia das soldas, lente objetiva 10X	47
Figura 43 – Metal de base SAE 1020 na solda de ponta cônica C1, lente objetiva 40X	49
Figura 44 – ZTA SAE 1020 na solda de ponta cônica C1, lente objetiva 40X	49
Figura 45 – Interface de ligação na solda de ponta cônica C1, lente objetiva 10X	50

Figura 46 – ZTA SAE 1045 na solda de ponta cônica C1, lente objetiva 40X	50
Figura 47 – Metal de base SAE 1045 na solda de ponta cônica C1, lente objetiva 40X	51
Figura 48 – Linhas de fluxo SAE 1020 na solda de ponta cônica C1, lente objetiva 10X....	51
Figura 49 – Metal de base SAE 1020 na solda de ponta cônica C2, lente objetiva 40X	52
Figura 50 – ZTA SAE 1020 na solda de ponta cônica C2, lente objetiva 40X	52
Figura 51 – Interface de ligação na solda de ponta cônica C2, lente objetiva 10X	53
Figura 52 – ZTA SAE 1045 na solda de ponta cônica C2, lente objetiva 40X	53
Figura 53 – Metal de base SAE 1045 na solda de ponta cônica C2, lente objetiva 40X	54
Figura 54 – Linhas de fluxo SAE 1020 na solda de ponta cônica C2, lente objetiva 10X....	54
Figura 55 – Metal de base SAE 1020 na solda de ponta plana P2, lente objetiva 40X	55
Figura 56 – ZTA SAE 1020 na solda de ponta plana P2, lente objetiva 40X	55
Figura 57 – Interface de ligação na solda de ponta plana P2, lente objetiva 10X	56
Figura 58 – ZTA SAE 1045 na solda de ponta plana P2, lente objetiva 40X	56
Figura 59 – Metal de base SAE 1045 na solda de ponta plana P2, lente objetiva 40X	57
Figura 60 – Linhas de fluxo SAE 1020 na solda de ponta plana P2, lente objetiva 10X	57
Figura 61 – Metal de base SAE 1020 na solda de ponta plana P3, lente objetiva 40X	58
Figura 62 – ZTA SAE 1020 na solda de ponta plana P3, lente objetiva 40X	58
Figura 63 – Interface de ligação na solda de ponta plana P3, lente objetiva 10X	59
Figura 64 – ZTA SAE 1045 na solda de ponta plana P3, lente objetiva 40X	59
Figura 65 – Metal de base SAE 1045 na solda de ponta plana P3, lente objetiva 40X	60
Figura 66 – Linhas de fluxo SAE 1020 na solda de ponta plana P3, lente objetiva 10X.....	60
Figura 67 – Perfil de microdureza perpendicular à linha de solda cônica	61
Figura 68 – Perfil de microdureza perpendicular à linha de solda plana	61
Figura 69 – Perfil de microdureza atravessando a interface de ligação	63
Figura 70 – Força de ruptura das soldas com pontas cônicas	65
Figura 71 – Força de ruptura das soldas com pontas planas	65
Figura 72 – Pares de solda de ponta cônica convexa de aço SAE 1045 (A) e ponta cônica côncava de aço SAE 1020 (B) para C3.....	67
Figura 73 – Pares de solda de ponta cônica convexa de aço SAE 1045 (A) e ponta cônica côncava de aço SAE 1020 (B) para C4.....	67
Figura 74 – Pares de solda de ponta cônica convexa de aço SAE 1045 (A) e ponta cônica côncava de aço SAE 1020 (B) para C5.....	67
Figura 75 – Pares de solda de ponta plana de aço SAE 1045 (A) e aço SAE 1020 (B) para P1.....	68
Figura 76 – Pares de solda de ponta plana de aço SAE 1045 (A) e aço SAE 1020 (B) para P4	68
Figura 77 – Pares de solda de ponta plana de aço SAE 1045 (A) e aço SAE 1020 (B) para P5.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química dos metais (% em peso)	19
Tabela 2 – Propriedades mecânicas do aço SAE 1020 e SAE 1045	19
Tabela 3 – Parâmetros de soldagem aproximados	35
Tabela 4 – Comprimento final dos corpos soldados	47
Tabela 5 – Dados de dureza em relação aos pontos coletados	63
Tabela 6 – Resultados de ruptura obtidos nos ensaios de tração.....	64

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Objetivos Gerais.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	Aços carbono.....	16
2.1.1	Caracterização do aço SAE 1020 e SAE 1045	16
2.2	Processo de soldagem por fricção.....	199
2.2.1	Breve histórico da soldagem por fricção.....	19
2.2.2	Soldagem por fricção convencional ou arraste contínuo.....	20
2.2.3	Etapas da soldagem por fricção convencional.....	22
2.3	Parâmetros relevantes do processo.....	23
2.4	Vantagens e limitações do processo de soldagem por fricção.....	29
2.5	Mecanismo de ligação na soldagem por fricção.....	30
3	METODOLOGIA.....	31
3.1	Caracterização do material de base	31
3.2	Instrumentação e adaptações do equipamento de soldagem.....	31
3.2.1	Torno de bancada.....	32
3.2.2	Célula de carga.....	33
3.2.3	Sistemas de aquisição de dados.....	34
3.3	Preparação dos corpos de prova para soldagem.....	34
3.4	Soldagem dos corpos de prova.....	35
3.4.1	Força de fricção.....	35
3.4.2	Tempo de fricção.....	35
3.4.3	Força de forjamento.....	35
3.4.4	Tempo de forjamento.....	36
3.5	Preparação e análise metalográficas das soldas.....	36
3.5.1	Análise macrografia.....	37
3.5.2	Análise microestrutural.....	37
3.6	Caracterização mecânica das soldas.....	38
3.6.1	Ensaio de Microdureza.....	38
3.6.2	Ensaio de tração.....	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
4.1	Microestrutura dos metais de base.....	40

4.2	Monitoramento da pressão e do torque de atrito.....	41
4.3	Análise visual dos corpos de prova.....	46
4.4	Análise microestrutural.....	48
4.5	Ensaio mecânicos.....	61
4.5.1	Ensaio de microdureza vickers.....	61
4.5.2	Ensaio de tração	64
5	CONCLUSÕES.....	69
	REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, os processos de soldagem vêm passando por transformações significativas, impulsionadas pela necessidade de atender a uma indústria cada vez mais exigente em termos de desempenho, versatilidade e sustentabilidade. Nesse cenário, destaca-se a soldagem no estado sólido como uma alternativa inovadora, capaz de unir materiais similares e diferentes sem que seja necessário fundi-los. Destaca-se a soldagem correta de metais como aços ao carbono, baixa liga, ligados e inoxidáveis, ligas de alumínio e cobre, soldadas, sendo que uma importante e rara situação, permitida por este processo, é a da soldagem dessas ligas com aços. Dentre outros processos estão a soldagem por fricção, difusão, explosão, entre outros (Machado, 1996; Tavares, 2017; Mir, 2022).

A aplicação da soldagem por fricção é especialmente relevante na indústria automobilística, que busca reduzir o peso dos veículos e, conseqüentemente, o consumo de combustível, por alívio de peso. Nos últimos anos, a técnica tem se expandido para diversos setores industriais, como o aeroespacial, nuclear, militar, de mineração e de petróleo (Li, 2016).

A soldagem por fricção convencional, também conhecida como fricção rotativa, foi desenvolvida em 1956 na Rússia, sendo o primeiro método baseado nesse princípio (Wainer, 2004). Ao considerar os desafios técnicos envolvidos na união de materiais por meio da solda sem necessidade de fusão do material, este trabalho busca compreender melhor as capacidades que a máquina criada para esse propósito pode alcançar, validando sua eficácia bem como a influência do formato da ponta de solda na máquina adaptada. Foram analisadas diferentes condições de força e tempo aplicadas antes do forjamento, com o objetivo de observar como essas variações influenciam a estrutura metalúrgica da junta e sua resistência mecânica.

Na prática, o processo de soldagem por fricção convencional acontece quando duas peças são pressionadas uma contra a outra, sendo que uma delas gira em alta velocidade enquanto a outra permanece parada. Esse movimento gera calor suficiente para amolecer as superfícies de contato, e, ao aplicar pressão contínua, ocorre a união dos materiais. Essa técnica dispensa a fusão, o que ajuda a evitar problemas comuns nos métodos de soldagem tradicionais, como falhas estruturais causadas por mudanças bruscas na microestrutura (Jeffus, 2021).

No Brasil, apesar de sua utilização em setores industriais como o automotivo e de petróleo, as pesquisas sobre soldagem por fricção convencional ainda são incipientes, logo é necessário criar e estudar as possibilidades da solda por atrito. Os principais parâmetros da

soldagem por fricção convencional incluem: velocidade de rotação, tempo e pressão de fricção, tempo e pressão de forjamento. A proposta justifica-se pelo interesse em estudar a qualidade da solda, influência da geometria dos corpos de prova e em qual temperatura é atingida pelo processo de soldagem, pela formação microestrutural da peça e análise mecânica resultante da solda.

1.1 Objetivos Gerais e Objetivos específicos

Este trabalho experimental tem como principal objetivo avaliar o efeito da geometria das faces nos parâmetros de soldagem, especificamente, nas propriedades mecânicas e metalúrgicas da interface de ligação em metais dissimilares SAE 1020 e SAE 1045. Para atender estes objetivos foram realizados os seguintes passos:

- Usinar e preparar os corpos de prova para a soldagem, em grupos de face cônica e face plana;
- Realizar as soldas com o torno de bancada adaptado para solda por atrito;
- Realizar ensaios mecânicos e análises metalográficas comparando resultados entre soldas com ponta cônica e plana em metais dissimilares SAE 1020 e SAE 1045.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A principal motivação para unir os aços SAE 1020 e SAE 1045 surgiu da necessidade de se combinar a boa soldabilidade, ductilidade e baixo custo do SAE 1020 com a maior resistência mecânica, dureza e capacidade de suportar esforços do SAE 1045, buscando assim aproveitar as vantagens de ambos os materiais em aplicações que exigem desempenho mecânico diferenciado aliado à viabilidade de processamento.

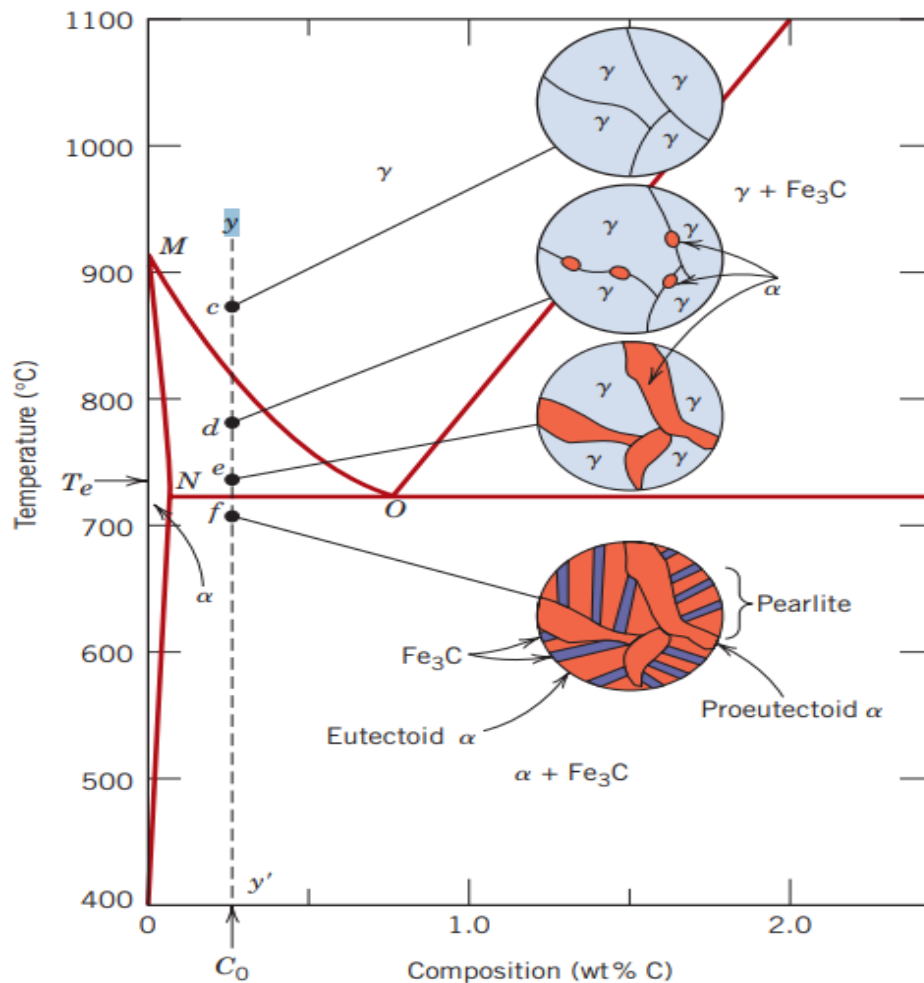
2.1 Aços carbono

A classificação dos aços carbono depende do seu teor de carbono de até 2%, e, também, dos outros elementos na sua composição, esses elementos afetam as propriedades mecânicas e a capacidade de usinagem do material. Os aços carbono separam-se em três tipos grandes: baixo carbono, que vai até 0,30% carbono, médio carbono, entre 0,30% e 0,60%, e alto carbono, acima de 0,60% (ASM International, 1993). Essa separação é muito importante para escolher os materiais em aplicações industriais, uma vez que, mais carbono aumenta a dureza e a resistência, mas diminui a elasticidade e a soldabilidade do aço. Apesar de ter uns outros elementos tipo manganês, que é intencionalmente adicionado para melhorar a resistência e tenacidade do aço, fósforo e enxofre, são elementos de liga residuais, mas afetam as propriedades do aço carbono. Como o estudo realizado utiliza os aços SAE 1020 e SAE 1045, serão abordadas somente as características desses aços.

2.1.1 Caracterização do aço SAE 1020 e SAE 1045

Com teor de carbono em peso menor do que 0,77%, os aços SAE 1020 e SAE 1045 são aços hipoeutetóides. Na Figura 1 é mostrada a evolução microestrutural para tais aços durante o resfriamento.

Figura 1 - Evolução microestrutural no resfriamento de aços hipoeutetóides

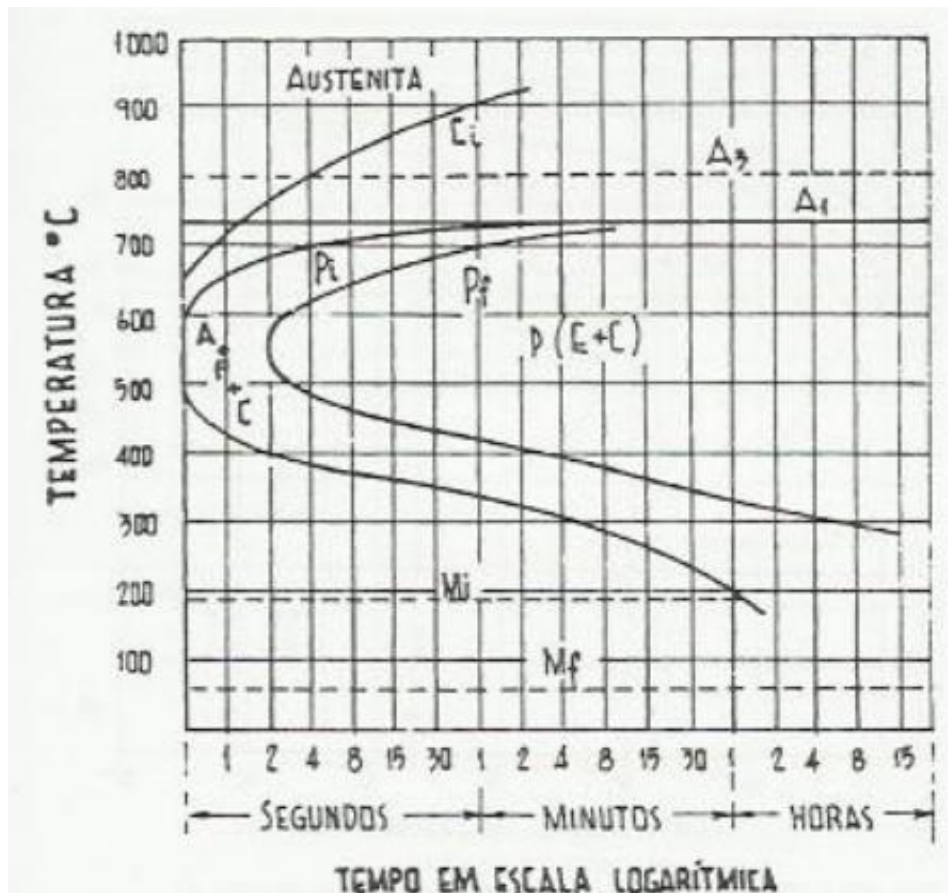


FONTE: Callister (2015. p. 386).

Ao ser aquecido a temperaturas superiores a 800 °C, a microestrutura predominante do aço torna-se a austenita – Fe γ (ponto c). Quando a temperatura cai abaixo de 800 °C e o resfriamento ocorre de forma contínua, inicia-se a nucleação da ferrita, que passa a crescer nos contornos de grão da austenita (ponto d). Ao atingir a temperatura eutetóide, de 727 °C, a fração de ferrita aumenta, e as fases presentes tornam-se austenita e ferrita ($\alpha + \gamma$). Nesse estágio, os grãos de austenita apresentam aproximadamente 0,77% de carbono e ficam envolvidos pela ferrita proeutetóide formada ao longo do processo de resfriamento (ponto e). Abaixo de 727 °C, a austenita se decompõe e se transforma em perlita, enquanto a ferrita já formada permanece inalterada (ponto f). O resfriamento até a temperatura ambiente não provoca alterações adicionais na microestrutura (Callister, 2015).

O aço SAE 1020 possui em torno de 0,20% de carbono, já o aço SAE 1045 possui em torno de 0,48% de carbono e apresenta uma microestrutura composta predominantemente por ferrita e perlita, típica de aços hipoeutetóides. Na Figura 2 é mostrado o diagrama TTT de aços hipoeutetóides. As curvas estão deslocadas para a esquerda, o que indica que as transformações de fase ocorrem mais rapidamente, dificultando a formação de estruturas bainíticas e martensíticas e favorecendo a formação de perlita. Isso se deve ao baixo teor de elementos de liga presentes no aço, o que exige menos difusão atômica durante o resfriamento (Chiaverini, 2008). Nas Tabelas 1 e 2 são apresentadas a composição química e as principais propriedades dos aços SAE 1020 e SAE 1045.

Figura 2 – Diagrama Temperatura Transformação e Tempo (TTT) de aços hipoeutetóides



FONTE: Chiaverini (2008. p. 34).

Tabela 1 - Composição química dos metais (% em peso)

Aço	%C	% Mn	% P (max)	% S (max)
SAE 1020	0.18 - 0.23	0.30 - 0.60	0.040	0.050
SAE 1045	0.47 - 0.50	0.60 - 0.90	0.040	0.040

FONTE: ASM International (1990).

Tabela 2 - Principais propriedades do aço SAE 1020 e SAE 1045

Propriedades	SAE 1020	SAE 1045
Densidade	7,87 g/cm ³	7,87 g/cm ³
Dureza Brinell (Normalizado)	190 – 210 HV	250 - 300 HV
Limite de resistência à tração (Normalizado)	392 MPa	671 MPa
Limite de escoamento (Normalizado)	233 MPa	353 MPa
Módulo de elasticidade	186 GPa	216 GPa
Alongamento (~ 50 mm)	27%	31%

FONTE: ASM International (1990).

2.2 Processo de soldagem por fricção

A soldagem por fricção é um processo de união em estado sólido no qual os materiais são ligados sem atingir a fusão. O calor necessário para promover a ligação surge da conversão de energia mecânica em térmica, gerada pelo atrito relativo entre as superfícies das peças em contato. Esse aquecimento local, combinado com pressão axial, provoca o amolecimento e o escoamento plástico dos materiais na interface, permitindo a formação de uma junta coesa e de alta resistência, sem a necessidade de uma fonte de calor externa ou material de adição (ASM International, 1993).

Esse método de união permite combinar uma série de materiais muito maior do que as técnicas de soldagem por fusão. Materiais de difícil soldabilidade por fusão, como aços de médio e alto teor de carbono (SAE 1045) são comumente soldados por fricção

Esse método é bem versátil e permite unir diferentes tipos de materiais que normalmente seriam difíceis de soldar com os processos tradicionais. Porém, alguns materiais com pouca capacidade de atrito, como ferro fundido, bronze e latão com bastante chumbo, acabam não funcionando bem com essa técnica (Wainer, 2004).

2.2.1 Breve histórico da soldagem por fricção

A soldagem por fricção, também conhecida como soldagem por atrito, é um processo que une materiais sem que eles precisem ser fundidos. Em vez disso, o calor necessário para a união é gerado pelo atrito entre as superfícies em contato. Isso permite que a junção aconteça ainda no estado sólido, o que reduz deformações, trincas e alterações indesejadas nos materiais (Wainer, 2004).

Embora o conceito já existisse no início do século XX, foi a partir da Segunda Guerra Mundial que essa técnica começou a ganhar espaço nas indústrias, especialmente por sua eficiência em unir materiais que apresentam dificuldades quando submetidos à soldagem por fusão (Machado, 1996). Aços com médio e alto teor de carbono, por exemplo, que costumam formar estruturas frágeis ou trincas quando soldados por métodos convencionais, podem ser unidos com usando a soldagem por fricção (ASM International, 1993; Jeffus, 2021).

Com o passar do tempo, o processo evoluiu, surgiram novas variações, como a soldagem por fricção com pino não consumível, mais conhecida como Friction Stir Welding (FSW), que revolucionou a soldagem de ligas de alumínio e outros metais sensíveis ao calor (Callister, 2015). Isso ampliou o uso da técnica em setores exigentes, como o aeroespacial e o automotivo, onde qualidade e confiabilidade são essenciais (Chiaverini, 2008).

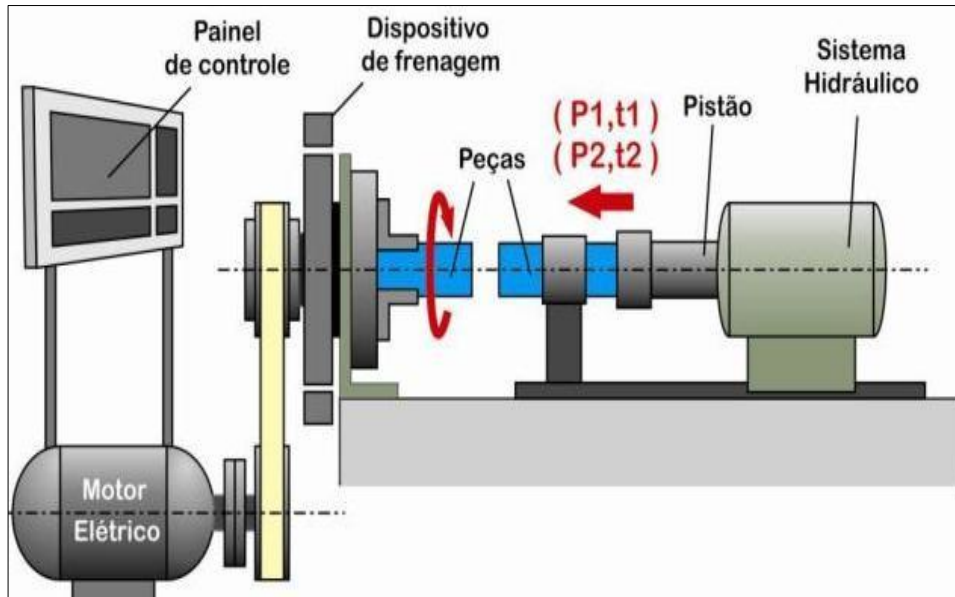
A soldagem por fricção convencional foi utilizada para soldagem dos corpos de prova, assim, será mais discutida.

2.2.2 Soldagem por fricção convencional ou arraste contínuo

Na soldagem por fricção convencional, o processo começa com a fixação das duas peças a serem unidas nas garras do equipamento. Uma delas permanece parada, presa ao um mandril conectado ao carro móvel do torno, enquanto a outra é colocada em rotação por meio de um motor, até atingir a velocidade determinada para a operação. Em seguida, a peça fixa é empurrada contra a peça giratória, iniciando o atrito entre as superfícies.

Esse atrito gera calor suficiente para amolecer as extremidades dos materiais, sem que ocorra fusão. Quando a temperatura ideal é atingida, aplica-se uma pressão inicial (P_1) por um tempo pré-definido (t_1), a rotação é interrompida de forma controlada. Mesmo com o movimento cessado, a pressão continua sendo aplicada e, nesse caso, é aumentada (P_2), durante mais alguns segundos (t_2), garantindo a união. Como mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Equipamento de soldagem por fricção de arraste contínuo



FONTE: PINHEIRO (2021).

Para a realização adequada da soldagem por fricção, é fundamental determinar o torque necessário, já que ele possui relação inversa com a temperatura na interface da junta. A potência exigida no processo convencional de soldagem por atrito pode ser calculada pela equação:

$$W = 2,7 \cdot \pi \cdot W \cdot \omega \cdot T \quad (1)$$

onde:

W = potência (W)

ω = velocidade de rotação (rads)

T = torque (N.m)

Para peças maciças de seção circular (barras), o torque pode ser estimado pela seguinte equação:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot P \cdot r^3 \quad (2)$$

onde:

μ = coeficiente de atrito

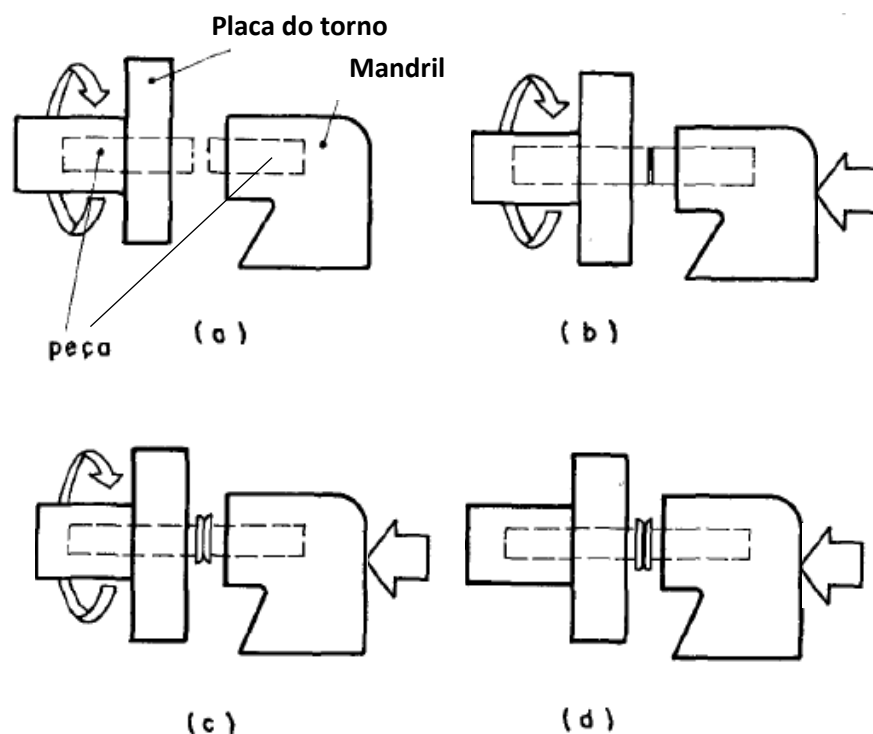
P = pressão aplicada (Pa)

r = raio da superfície (m)

2.2.3 Etapas da soldagem por fricção convencional

No processo de soldagem por atrito convencional, as etapas seguem uma sequência bem definida. Na etapa (a), o mandril é girado até atingir a rotação desejada, preparando o sistema para o início da soldagem. Em seguida, na etapa (b), o cabeçote é aproximado do mandril, aplicando-se uma pressão controlada entre as peças a serem unidas. Já na etapa (c), denominada fase de aquecimento, tanto a rotação quanto a pressão são mantidas por um certo tempo, permitindo o aquecimento das superfícies de contato devido ao atrito gerado entre elas. Por fim, na etapa (d), chamada fase de forjamento, a rotação é interrompida e a pressão é mantida ou aumentada por mais um período, garantindo a formação da junta sólida entre os materiais, sem a necessidade de fusão ou adição de material externo. (Wainer, 2004).

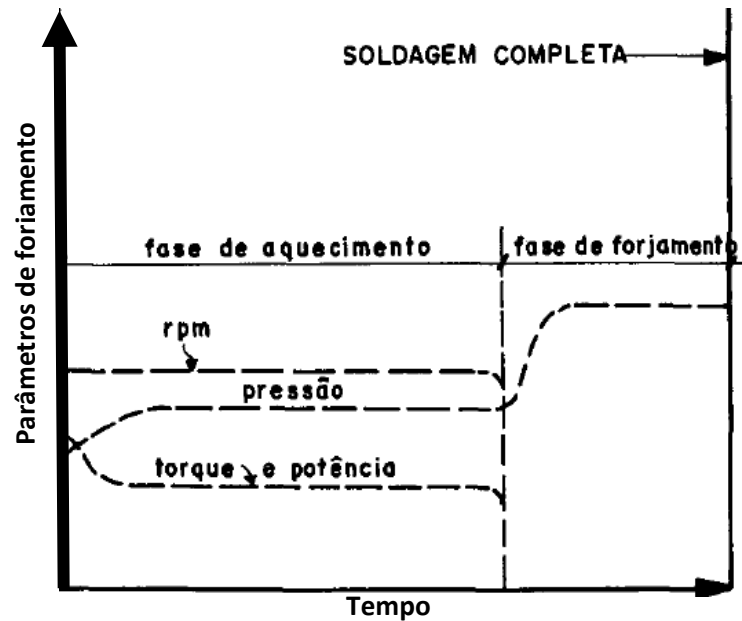
Figura 4 - Etapas da soldagem por fricção



Fonte: Adaptado de WAINER (2004. p. 318).

Na Figura 5 é apresentado graficamente o comportamento dos parâmetros de soldagem em função das fases descritas acima.

Figura 5 – Variação dos parâmetros X tempo para a soldagem por fricção convencional



FONTE: Adaptado de WAINER (2004. p. 319).

Como o processo não envolve a fusão do metal base nem a contaminação pela atmosfera, as propriedades mecânicas da junta soldada permanecem bastante próximas às do material original. Além disso, a variação de dureza ao longo da zona termicamente afetada é mínima (Wainer, 2004).

2.3 Parâmetros relevantes do processo

De acordo com (ASM International, 1993), (Wainer, 2004) e (Jeffus, 2021), os parâmetros mais importantes que influenciam a soldagem por fricção são aqueles que controlam a geração de calor por atrito e o fluxo plástico dos materiais na interface de união. Entre esses, destacam-se:

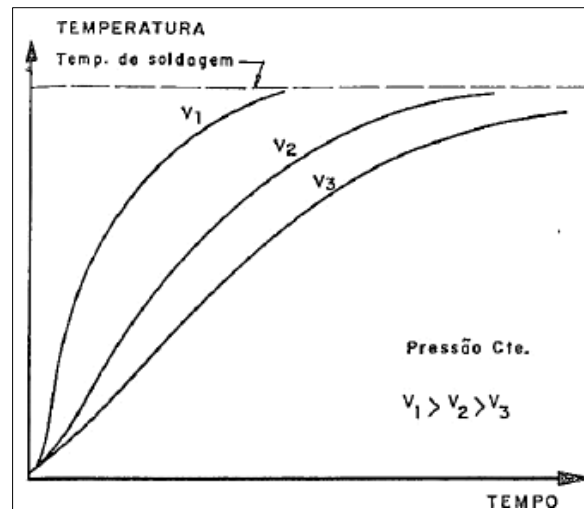
- Velocidade de rotação
- Pressão axial
- Tempo de atrito e de forjamento
- Torque e energia aplicada
- Geometria das peças

Velocidade de rotação

A velocidade de rotação é um dos principais parâmetros que influenciam diretamente a qualidade da soldagem por atrito. Ela determina a quantidade de calor gerado pelo atrito entre as superfícies das peças a serem unidas, afetando, portanto, o ciclo térmico do processo. Uma velocidade de rotação mais elevada resulta em um aumento da taxa de geração de calor, o que pode acelerar o amolecimento das superfícies em contato e reduzir o tempo necessário para atingir a temperatura ideal de soldagem. No entanto, se essa velocidade for excessiva, pode causar superaquecimento localizado, oxidação superficial (caso não esteja em ambiente controlado), formação excessiva de rebarba e possível degradação da microestrutura da zona soldada. Por outro lado, velocidades muito baixas podem não gerar calor suficiente, comprometendo a plastificação adequada do material, o que resulta em juntas frágeis ou incompletas. Assim, a escolha da rotação ideal deve ser feita com base na combinação dos materiais envolvidos, suas propriedades térmicas e mecânicas, bem como nas dimensões e geometria das peças (Wainer, 2004).

A rotação deve ser cuidadosamente ajustada para garantir um equilíbrio entre a geração de calor e o controle da deformação do material na interface. Para aços de alta resistência, por exemplo, velocidades intermediárias são geralmente preferidas, pois evitam tanto a fragilização térmica quanto o esforço excessivo nas bordas da junta. A literatura ressalta que a velocidade de rotação ideal não é um valor fixo, mas sim dependente do sistema como um todo: tipo de material, pressão aplicada, tempo de fricção e temperatura ambiente. Além disso, observa-se que a velocidade influencia o perfil de dureza na zona termicamente afetada (ZTA), pois altera o tempo de exposição à temperatura crítica e, consequentemente, o comportamento metalúrgico da junta. Portanto, a velocidade de rotação deve ser considerada um parâmetro fundamental e interdependente, que precisa ser cuidadosamente definido para assegurar a integridade estrutural e a repetibilidade do processo de soldagem por atrito (ASM International, 1993).

Figura 6 - Influencia da velocidade de soldagem no tempo de aquecimento das peças à pressão constante



FONTE: Wainer, (2004, p. 323).

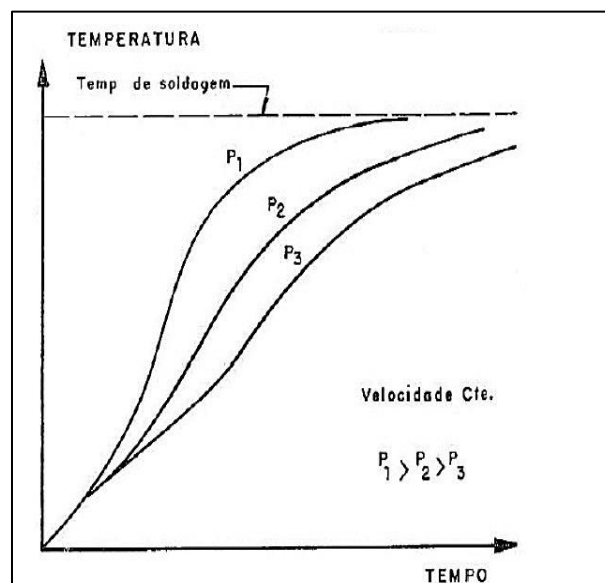
Força axial/ Pressão axial

A força axial, ou pressão aplicada ao longo do eixo das peças a serem unidas, é um dos parâmetros mais críticos na soldagem por atrito, pois atua diretamente na geração do calor necessário para plastificar o material na interface de contato, essa força é essencial para manter o atrito constante entre as superfícies durante a fase inicial do processo, promovendo o aquecimento sem fusão. O controle adequado da pressão determina a taxa de geração de calor, a espessura da camada plastificada e a rebarba. Se for aplicada uma pressão muito baixa, pode não haver calor suficiente, resultando em falhas na união; se for excessiva, pode haver deformação indevida ou até mesmo a expulsão de material antes da formação eficaz da junta (ASM International, 1993). A pressão axial atua em conjunto com a velocidade de rotação e o tempo de fricção, sendo um dos pilares do controle de qualidade na soldagem por atrito, destacando que a seleção incorreta deste parâmetro pode comprometer tanto a resistência mecânica quanto a integridade estrutural da solda (Jeffus, 2021).

Na fase de forjamento, que ocorre após a interrupção da rotação, a pressão axial é mantida ou até aumentada, com o objetivo de consolidar a junta solidamente. Esta etapa é decisiva para a eliminação de possíveis descontinuidades internas e para promover a difusão entre as superfícies aquecidas, garantindo a continuidade metalúrgica da união (Machado, 1996). A pressão de forjamento influencia diretamente na formação da microestrutura final da zona soldada e é particularmente importante para evitar inclusões ou porosidade (Wainer, 2004). Essa pressão também influencia o perfil térmico da junta, afetando a extensão da zona

termicamente afetada (ZTA) e, por consequência, as propriedades mecânicas finais da peça. Assim, a força axial deve ser cuidadosamente ajustada conforme o tipo de material, sua condutividade térmica, limite de escoamento e as condições operacionais do equipamento, sendo um parâmetro interdependente e essencial na eficácia do processo de soldagem por atrito (Callister, 2015).

Figura 7 - Influência da pressão de soldagem no tempo de aquecimento à velocidade de rotação constante



FONTE: Wainer (2004. p. 324).

Tempo de aquecimento

O tempo de aquecimento corresponde ao intervalo entre o início do contato entre as superfícies em atrito e o término da fase de frenagem. Esse parâmetro é diretamente influenciado por variáveis como a força axial e a velocidade de rotação. De modo geral, o aumento da força axial intensifica o atrito entre as superfícies, o que acelera a geração de calor e, conseqüentemente, reduz o tempo necessário para atingir a temperatura ideal de plastificação. Da mesma forma, velocidades de rotação mais elevadas aumentam a taxa de calor gerado por fricção, também contribuindo para a diminuição do tempo de aquecimento.

É um dos fatores cruciais para a formação de uma junta eficiente e com boas propriedades mecânicas (Ojetoye, 2024). Durante a fase de fricção, esse tempo refere-se ao período em que as superfícies das peças estão em contato sob pressão e movimento relativo, permitindo o aumento de temperatura até que o material na interface atinja um estado plastificado, mas sem fusão. O tempo de aquecimento influencia diretamente a profundidade da zona

plastificada, a quantidade de flash e o grau de recristalização na interface. Um tempo muito curto pode resultar em aquecimento insuficiente, prejudicando a ligação metalúrgica entre as peças. Por outro lado, um tempo excessivamente longo pode causar superaquecimento, degradação das propriedades do material e aumento indesejado da zona termicamente afetada. O controle preciso do tempo de aquecimento, portanto, deve ser baseado nas propriedades térmicas dos materiais envolvidos e na geometria da junta, sendo ajustado em conjunto com a velocidade de rotação e a força axial (ASM International, 1993).

Esse tempo um dos três principais parâmetros de controle da soldagem por atrito, ao lado da rotação e da pressão. Explica que esse tempo precisa ser suficiente para atingir a temperatura crítica na interface sem exceder o limite de deformação plástica desejado (Jeffus, 2021). Isso está relacionado diretamente com a integridade metalúrgica da união e a formação de grãos finos na zona de solda. Além disso, a importância do ciclo térmico em processos de fabricação se destaca na duração do aquecimento que influencia o tamanho de grão, a difusão atômica e os fenômenos de recristalização, todos relevantes no contexto da soldagem por atrito. Uma taxa de aquecimento controlada e um tempo bem dimensionado ajudam a garantir uma microestrutura mais homogênea e resistente. Portanto, o tempo de aquecimento, quando corretamente ajustado, contribui para a eficiência energética do processo e para a qualidade estrutural da solda (Callister, 2015).

Comprimento / taxa de queima

Na soldagem por atrito, o comprimento de queima (em inglês, burnoff length) ou a taxa de queima (burnoff rate) refere-se à redução axial total que ocorre nas peças durante a fase de fricção, antes do início do forjamento. Esse comprimento indica o quanto de material é plastificado e extrudado para fora da interface de solda como resultado do atrito gerado entre as superfícies em movimento. O burnoff é uma variável crítica que serve como referência para o controle da repetibilidade do processo. Um comprimento de queima bem dimensionado assegura que a zona de contato tenha sido suficientemente plastificada, promovendo a formação de uma junta sólida e contínua. Além disso, o burnoff pode ser usado como critério automático de fim da fase de fricção, substituindo medições de tempo em sistemas automatizados. Os principais fatores que influenciam o burnoff incluem a força axial, a velocidade de rotação, as propriedades mecânicas dos materiais envolvidos e o tempo de fricção. Valores inadequados de comprimento de queima podem resultar em soldas incompletas, inclusão de descontinuidades ou perda de controle dimensional da peça final (ASM International, 1993).

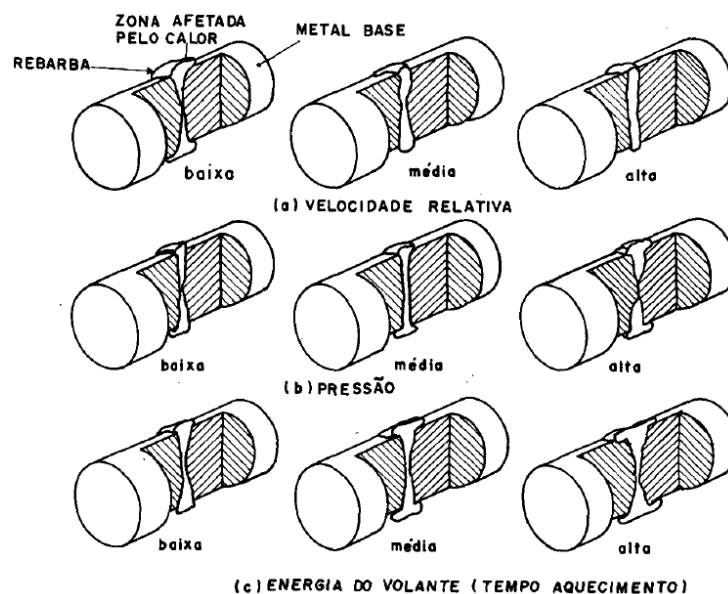
O comprimento de queima é um indicador prático da qualidade do processo de soldagem por atrito, especialmente em linhas de produção onde a repetibilidade é fundamental. Ele ressalta que, ao controlar adequadamente essa variável, é possível garantir uma interface livre de óxidos e contaminantes, uma vez que o material superficial é continuamente expelido durante a fricção (Jeffus, 2021). A deformação plástica induzida na região da solda, relacionada ao burnoff, está diretamente ligada a mecanismos de recristalização e refinamento de grão, fundamentais para a integridade estrutural da junta. Assim, a taxa e o comprimento de queima não apenas controlam a geometria final da peça, mas também influenciam a microestrutura obtida e, assim, as propriedades mecânicas da solda. Portanto, a gestão adequada do burnoff é indispensável tanto para o controle dimensional quanto para a qualidade metalúrgica na soldagem por atrito (Callister, 2015). Na Figura 8 é possível ver como as propriedades do material são afetadas pelo aquecimento na solda e ZTA.



FONTE: Adaptado de Mir (2022)

Na Figura 9 é apresentada a mudança na morfologia das soldas mediante a variação dos parâmetros citados anteriormente.

Figura 9 - Influência dos parâmetros de soldagem na morfologia da solda



FONTE: Wainer (2004. p. 324).

2.4 Vantagens e limitações do processo de soldagem por fricção

A seguir, são apresentadas as principais vantagens e limitações do processo de soldagem por fricção rotativa, conforme descritas na literatura técnica especializada (ASM International, 1993); (Machado, 1996); (Jeffus, 2021); (Murugan, 2021).

Vantagens do Processo de Soldagem por Fricção

- Não requer metal de adição nem atmosfera protetora.
- Alto desempenho mecânico e alta qualidade da junta, até em metais difíceis de soldar.
- ZTA (Zona Termicamente Afetada) extremamente reduzida, minimizando alterações metalúrgicas indesejadas.
- Baixo consumo de energia elétrica, mais eficiente do que processos por fusão.
- Sem formação de defeitos de solidificação, pois é um processo em estado sólido.
- Capacidade de unir metais dissimilares.
- Menor risco de acidentes, já que não há arco elétrico, radiação ou respingos.
- Processo competitivo com o forjamento, podendo ser preferido para aplicações específicas.

Limitações do Processo de Soldagem por Fricção

- Necessidade de geometria circular em uma das peças.
- Equipamento robusto e preciso é necessário para garantir alinhamento e aplicar forças adequadas.
- Alta exigência de alinhamento: peças com geometrias complexas podem exigir equipamentos especiais e maior investimento.
- Limitada a certos tipos de juntas, como juntas planas ou cônicas.
- Peças devem suportar deformações plásticas, pois pelo menos um dos materiais deve ser deformável sob as condições do processo.
- Peças devem resistir aos esforços na interface, ou seja, materiais frágeis podem não ser adequados sem reforço.
- Alto investimento em equipamentos e fixação, tornando o processo menos acessível em pequenas operações.

2.5 Mecanismo de ligação na soldagem por fricção

Na soldagem por fricção, a ligação entre os metais ocorre em estado sólido, por meio da deformação plástica intensa e do contato íntimo entre superfícies limpas e aquecidas por atrito. O processo começa com a remoção mecânica de óxidos, filmes e impurezas presentes nas superfícies de contato. Isso é possível graças à combinação entre o calor gerado pelo atrito e a força axial aplicada, que força os materiais a fluírem lateralmente, expelindo essas camadas contaminantes sob a forma de “flash”. Esse efeito assegura que a região de interface esteja composta essencialmente por material metalúrgico puro, permitindo a formação de uma ligação sólida por recristalização dinâmica e difusão atômica (Wainer, 2004). Essa recristalização é favorecida pela combinação de temperatura elevada e deformação intensa, o que gera grãos refinados e homogêneos, contribuindo para propriedades mecânicas superiores.

Além da remoção de contaminações e do amolecimento superficial, durante a soldagem por fricção, o calor gerado pelo atrito entre as superfícies e a aplicação de pressão promovem a movimentação das estruturas internas dos metais, especialmente nas regiões de contato. (Jeffus, 2021).

A pressão contínua aplicada durante e, após o atrito, faz com que os átomos das superfícies em contato se aproximem a distâncias suficientemente pequenas para que ocorra difusão, permitindo a formação de ligações metálicas diretas, sem a necessidade de fusão ou zona líquida (ASM International, 1993). O processo gera juntas com características metalográficas contínuas, e esse modo de união permite até a soldagem entre ligas dissimilares, desde que ambas permitam fluxo plástico na interface, baseado na conformação e no contato das superfícies ativadas (Machado, 1996); (Jeffus, 2021).

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa tem como objetivo analisar o processo de soldagem por atrito em pares de barras cilíndricas de aço SAE 1020 e SAE 1045, com superfícies de contato planas e cônicas. A ideia é avaliar como o formato da face de união influencia a qualidade da junta soldada. Para isso, adotamos uma metodologia experimental, realizada em um laboratório controlado, utilizando um torno adaptado para soldagem por atrito rotativa. Para os materiais usamos cilindros de aço SAE 1020 e SAE 1045, cada um com 7,93 mm de diâmetro e pares formados por corpos de prova de 50 mm para o aço SAE 1020 e 65 mm de comprimento, para o aço SAE 1045.

Grupo 1: Cilindros com faces de contato cônicas, apresentando um ângulo de inclinação de 90° em relação à base.

Grupo 2: Cilindros com faces de contato planas.

Todos os corpos de prova passaram por usinagem prévia em torno mecânico para garantir a precisão nas dimensões e um acabamento superficial adequado. Etapas de metodologia adotadas:

- Escolha e caracterização do metal a ser soldado
- Preparação dos corpos de prova para soldagem
- Soldagem dos corpos de prova: face cônica e plana
- Preparação e análise metalográficas das soldas
- Análise mecânica das soldas

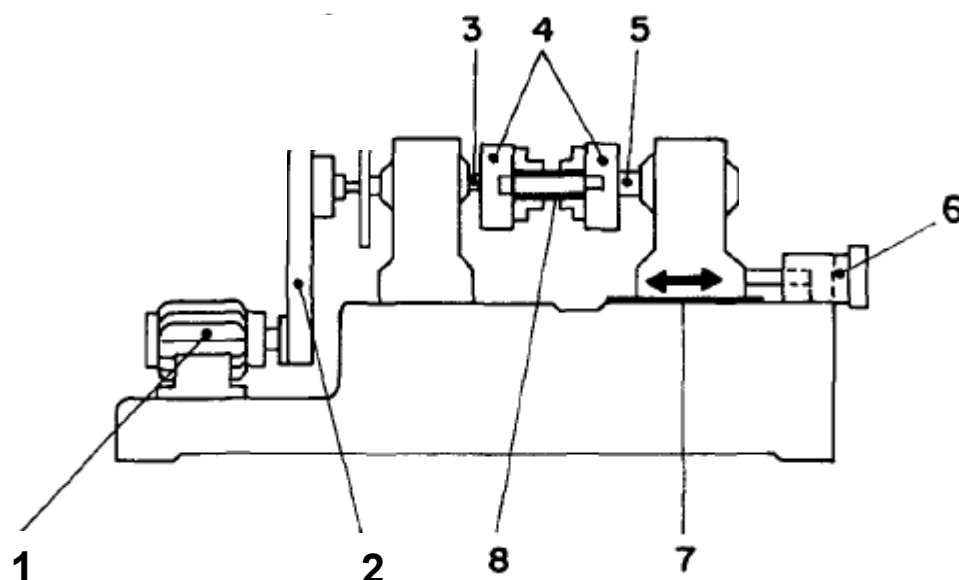
3.1 Caracterização do material de base

Os metais utilizados foram barras maciças cilíndricas de aço de baixo carbono SAE 1020 e médio carbono SAE 1045, com diâmetro de 7,93 mm, que foram adquiridas na UNAFE – Ferro e Aço. Os materiais vieram em segmentos de 1000 mm de comprimento.

3.2 Instrumentação e adaptações do equipamento de soldagem

3.2.1 Torno de bancada

Figura 10 - Desenho esquemático simplificado das partes de um torno mecânico adaptado à solda por atrito



Fonte: Adaptado de Wainer (2004, p. 324).

No desenho esquemático da Figura 10, o motor elétrico (1), aciona e transmite força para a correia (2) que gira um conjunto de polias ligado a um eixo (3). Dessa forma, os corpos de prova presos na plana do torno e mandril (4) que está ligado no eixo (5) são atritados pelo deslocamento do carro móvel (7), toda essa força é aplicada numa célula de carga com um braço de alavanca (6).

Um torno de bancada da marca Myford foi modificado para as soldas nesse trabalho, retirando o carro principal, auxiliar e transversal, torre porta ferramentas. Restou apenas para funcionamento da máquina, o motor, barramento, carro móvel, castanha e polias. Esse torno tem uma velocidade máxima, de 870 rpm com a configuração de polia de 2' no eixo do motor e com as correias nas polias corretas, mas com o eixo pode chegar a 1484 rpm.

A força de atrito para soldagem foi aplicada nos corpos de prova de maneira gradual, manualmente através de uma alavanca, monitorando em tempo real no computador com o software utilizado que marcava os dados da célula de carga. Essa carga foi aplicada em uma haste de aço, a qual foi acoplada na alavanca montada para o experimento. Esse braço de alavanca que transfere a carga para a cremalheira que coordena o movimento de movimento do carro móvel. Pode ser visualizada na Figura 11.

Figura 11 – Maquinário utilizado para realização das soldas



FONTE: Autor (2025).

3.2.2 Célula de carga

Com o objetivo de monitorar a força de compressão durante o processo de soldagem, uma célula de carga foi disposta de outro equipamento que já era utilizado na faculdade. Ela foi projetada para suportar uma força de compressão de 250 Kgf, imagem da célula na Figura 12.

FIGURA 12 – Célula de carga



FONTE: Autor (2025).

3.2.3 Sistemas de aquisição de dados

Nesse trabalho, utilizaram-se um sistema de aquisição de dados, destinado à célula de carga. A captura dos sinais de tensão emitido pela célula de carga realizada através do módulo de aquisição, e o software empregado na leitura dos sinais foi o LabRio.

3.3 Preparação dos corpos de prova para soldagem

Os corpos de prova foram adquiridos com comprimento de 1000 mm. Por esta razão, antes de serem soldados, eles passaram por processo de corte para adequação do comprimento e também tiveram a face superior e inferior usinadas em torno mecânico convencional. Após o corte, o aço apresentou comprimento de 50 mm e 65 mm. O aumento de 15 mm em um dos corpos de prova se deve à melhor posicionamento e para de contato da castanha da placa do torno evitando o deslocamento do mesmo. Na Figura 13 são apresentados os corpos de prova após ajuste do comprimento.

Figura 13 – Corpos de prova com as pontas usinadas



FONTE: Autor (2025).

Após o corte e usinagem dos corpos de prova, eles foram lixados. Esse procedimento tem como objetivo remover elementos contaminantes como óleos, graxas e fluidos oriundos do processo de usinagem. Para evitar nova contaminação durante o manuseio no processo de soldagem, os corpos de prova foram manipulados cuidadosamente para que não houvesse contaminação das faces de soldagem.

3.4 Soldagem dos corpos de prova

Para a definição dos parâmetros de soldagem foram realizados testes preliminares para estabelecer a força de fricção, o tempo de fricção, a força de forjamento, o tempo de forjamento e a temperatura de pré-aquecimento. Após levantamento dos parâmetros, os corpos de prova foram soldados em duas condições: com a pontas cônicas e pontas planas.

3.4.1 Força de fricção

Realizados cinco ensaios experimentais com o objetivo de entender melhor como as forças de atrito se comportam durante a soldagem por atrito para observar de que forma essas mudanças afetavam a força de atrito entre as peças. Os dados foram coletados por um software de monitoramento, que registrou em tempo real os valores da força ao longo de todo o processo. Com esses resultados, conseguimos avaliar a consistência e a eficiência da união das peças, além de obter informações importantes para melhorar e otimizar os parâmetros do procedimento.

3.4.2 Tempo de fricção

Os tempos variaram de 50 segundos a 180 segundos, enquanto foi mantido constantes outros parâmetros, como a velocidade de rotação e a pressão inicial, para garantir que os resultados fossem confiáveis.

A coleta de dados foi feita com um software de aquisição, que registrou as variações de força durante cada teste. Após o tempo de fricção definido para cada ensaio, aplicamos a carga de forjamento, que é crucial para consolidar a união entre as peças.

3.4.3 Força de forjamento

Na fase de forjamento, a força aplicada aos corpos de prova pode ser mantida constante ou até aumentada, dependendo da estratégia escolhida para o processo. Como as cargas foram aplicadas manualmente, foi aumentada a força constante durante essa etapa, garantindo assim uma melhor solda nos testes. Dessa forma, a força de forjamento utilizada foi maior que registrada durante a fricção.

3.4.4 Tempo de forjamento

O tempo aproximado de testes foram de dois minutos para que o tempo total de testes não ficasse muito longo, nem a solda perdesse seu melhor parâmetro tanto por aquecimento excessivo quanto desalinhamento da máquina por vibração.

Tabela 3 - Parâmetros de soldagem aproximados

Velocidade de rotação (rpm)	Tempo de fricção (s)	Pressão de fricção (Kgf)	Tempo de forjamento (s)	Força de forjamento (Kgf)
1484	120	170	3	250

FONTE: Autor (2025).

O processo de soldagem foi dividido em duas fases principais: fricção e forjamento.

3.5 Preparação e análise metalográficas das soldas

Após a realização da soldagem, as amostras foram seccionadas transversalmente à linha de solda. Cada seção foi então embutida a quente em baquelite, utilizando uma embutidora da marca Pantec, modelo PANPRESS 30. As amostras embutidas passaram pelo processo de lixamento em uma politriz-lixadeira metalográfica da marca Panambra, modelo DP-10 empregando-se lixas d'água com granulometrias progressivas: #80, #150, #220, #320, #400, #600 e #1500. Concluído o lixamento, procedeu-se à lavagem com água corrente e álcool etílico, seguida de secagem com ar quente.

Na sequência, realizou-se o polimento das amostras com pasta abrasiva de alumina. Finalizado o polimento, as amostras foram novamente lavadas com água destilada, álcool etílico e secas com jato de ar quente. Para a revelação da microestrutura, aplicou-se ataque químico por esfregamento, o reagente utilizado foi Nital 2%.

3.5.1 Análise macrografia

A análise macrográfica foi realizada usando o estereoscópico da marca SteREO, modelo Discovery V8, acoplado a câmera AxioCam, modelo Erc 5s, mostrado na Figura 14.

Figura 14 - Estereoscópio



FONTE: Autor (2025).

3.5.2 Análise microestrutural

A estrutura dos metais de base, ZTA e junta soldada foi analisada no microscópio metalográfico, da marca Kontrol, modelo IM100. Mostrado na Figura 15

Figura 15 – Microscópio óptico



FONTE: FORTEL. Acesso em: 23 maio 2025.

3.6 Caracterização mecânica das soldas

A avaliação das propriedades mecânicas da junta soldada foi conduzida por meio dos ensaios de microdureza Vickers e de tração.

3.6.1 Ensaio de Microdureza

O ensaio de microdureza foi conduzido utilizando um microdurômetro da marca SHIMADZU, modelo HMV-2T, conforme ilustrado na Figura 16. O tempo de aplicação da carga durante as medições foi de 15 segundos. A carga aplicada foi de 2942 N para ambos os metais

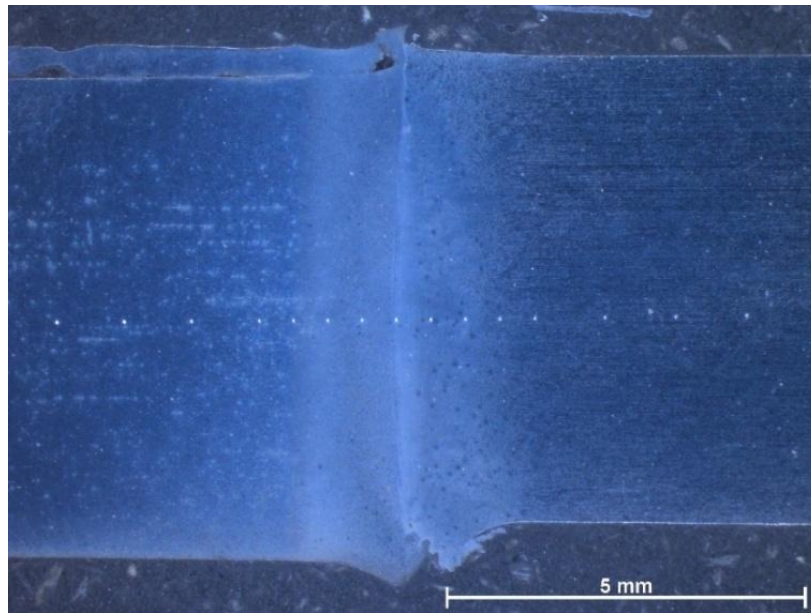
Figura 16 – Microdurômetro



FONTE: Autor (2025).

O perfil de microdureza foi obtido ao longo do eixo horizontal do corpo de prova. As medições foram realizadas com espaçamento de 1 mm nos quatro primeiros e nos quatro últimos pontos, e de 0,5 mm entre os sete pontos centrais, totalizando 15 medições, conforme ilustrado na Gráfico da força no tempo para solda C1.

Figura 17 – Macrografia do perfil de microdureza Vickers



FONTE: Autor (2025).

3.6.2 Ensaio de tração

Os corpos de prova, foram submetidos a ensaios de tração com o objetivo de determinar a resistência máxima à tração das juntas soldadas. Foram realizados sete ensaios, um ensaio teste com o aço e outros seis realizados com solda, três com ponta cônica e três planas. Em ambas as condições de soldagem, a ruptura ocorreu na linha de solda.

Os corpos de prova soldados foram testados com a máquina de ensaio de tração da marca TIME, modelo WDW – 100E. Os ensaios foram feitos com velocidade de ensaio de 2 mm/mim e não foram usinados, equipamento ilustrado na Figura 18.

Figura 18 – Máquina de ensaio de tração



FONTE: Autor (2025).

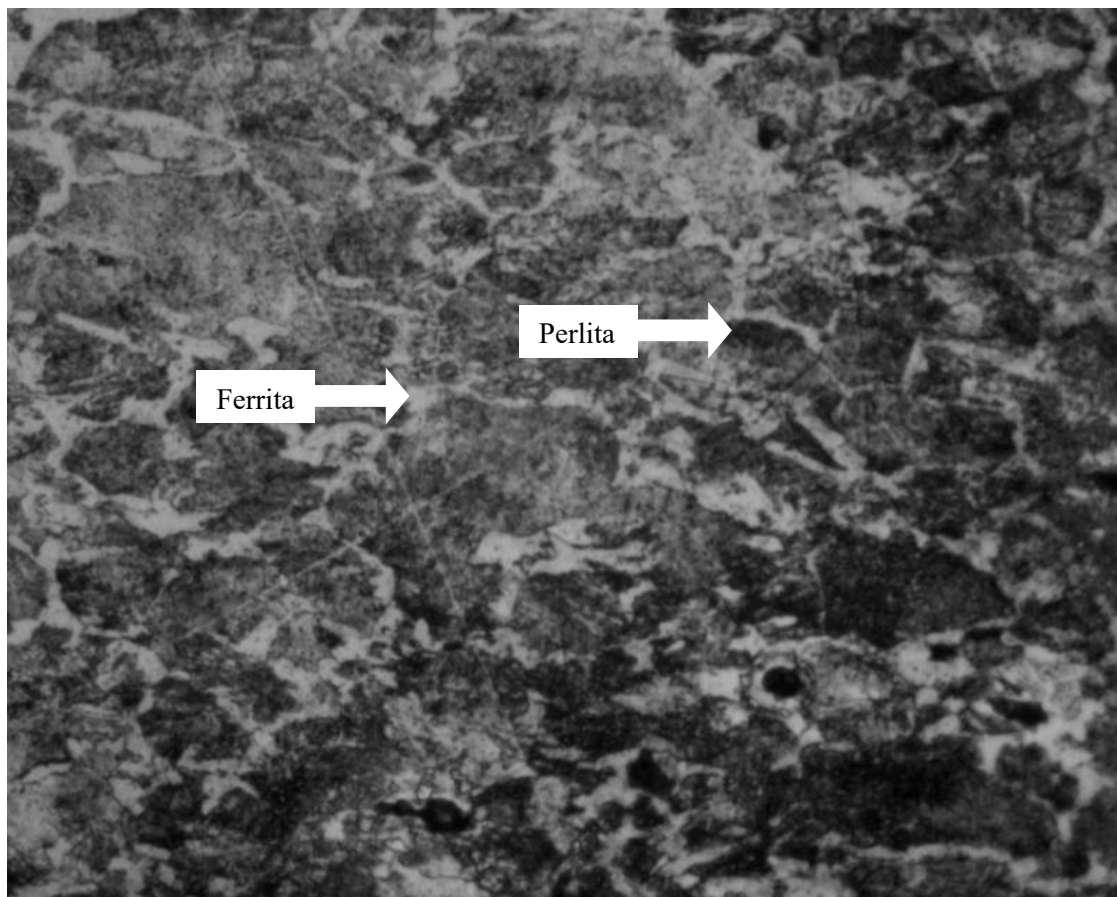
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos da soldagem por fricção convencional do aço SAE 1020 e SAE 1045.

4.1 Microestrutura dos metais de base

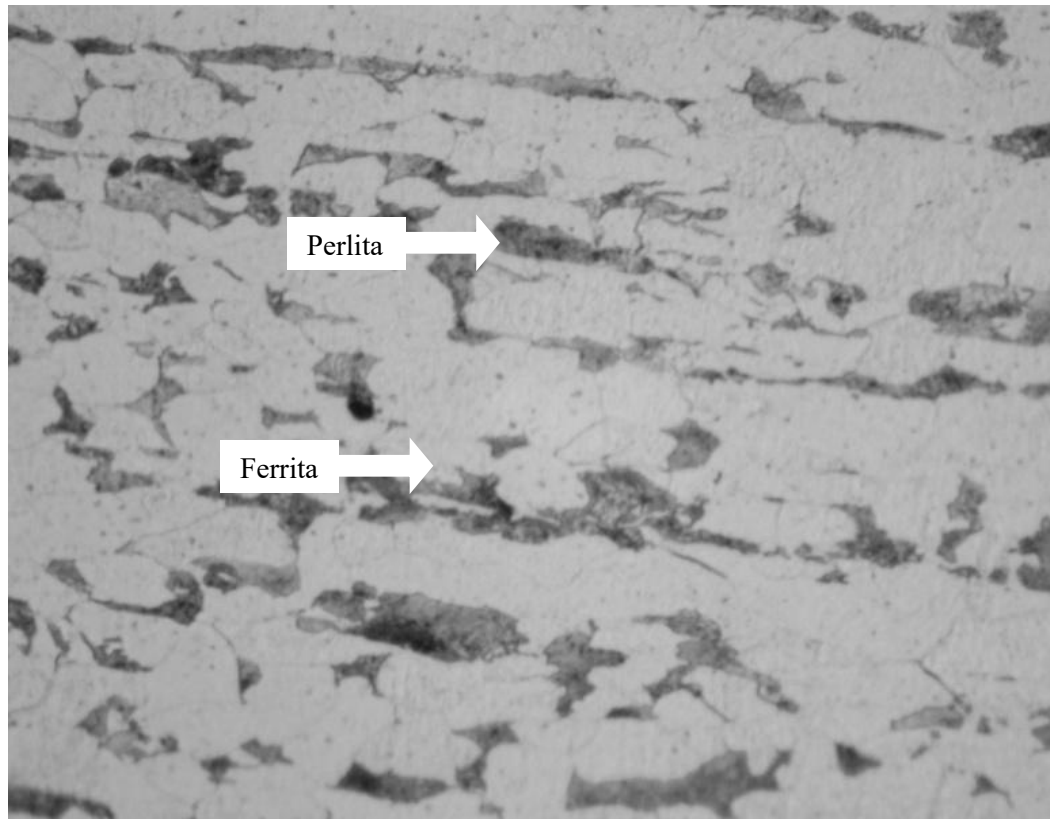
A microestrutura da liga SAE 1020 e SAE 1045 é composta por uma matriz ferrítica com colônias de perlita, sendo essas distinguíveis no microscópio com maior presença de perlita no aço SAE 1045 do que no aço SAE 1020. Conforme as Figuras 19 e 20.

Figura 19 – Microestrutura da liga SAE 1045



FONTE: Autor (2025).

Figura 20 – Microestrutura do aço SAE 1020



FONTE: Autor (2025).

4.2 Monitoramento da pressão e do torque de atrito

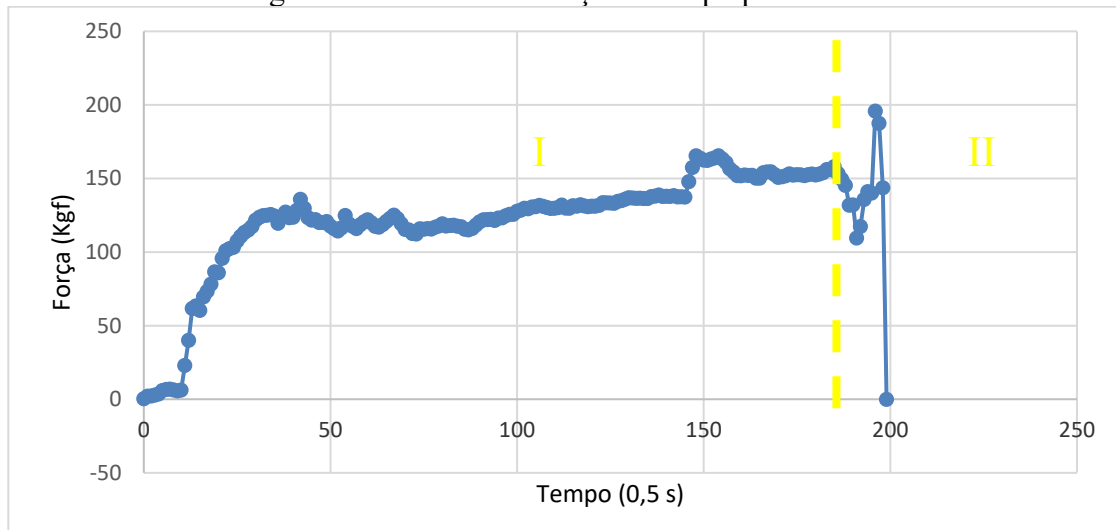
A pressão aplicada entre todos os corpos de prova durante o processo foi monitorada em tempo real com o auxílio de uma célula de carga. A Figura 21 apresenta, em uma das soldas, o comportamento da variação da tensão ao longo do tempo, sendo que as setas nos gráficos indicam o momento da aplicação da última carga. As Figuras 22 à 30 demonstram a força em decorrência do tempo.

Figura 21 – Monitoramento da tensão para uma das soldas



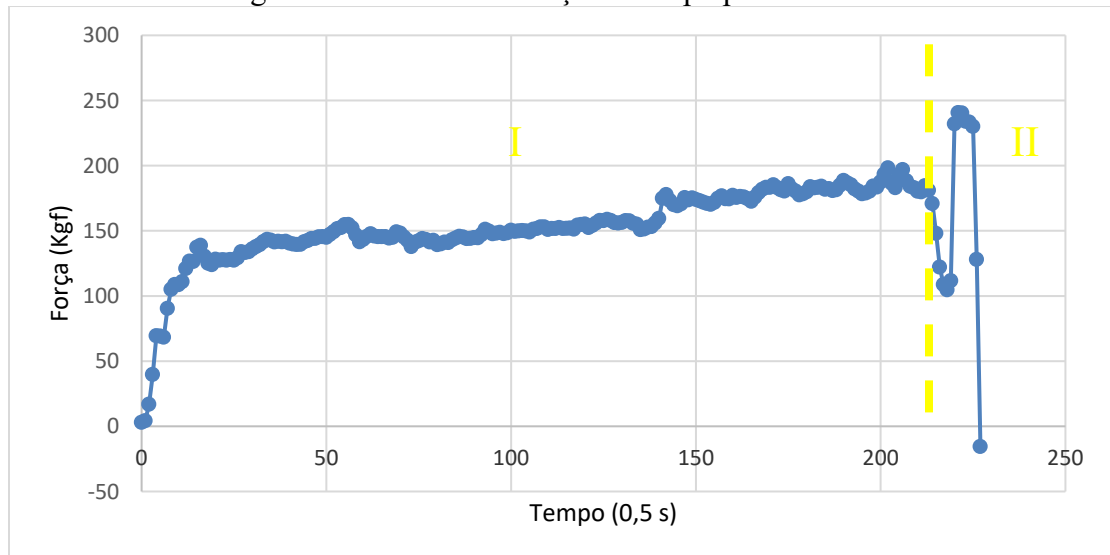
FONTE: Autor (2025).

Figura 22 – Gráfico da força no tempo para solda C1



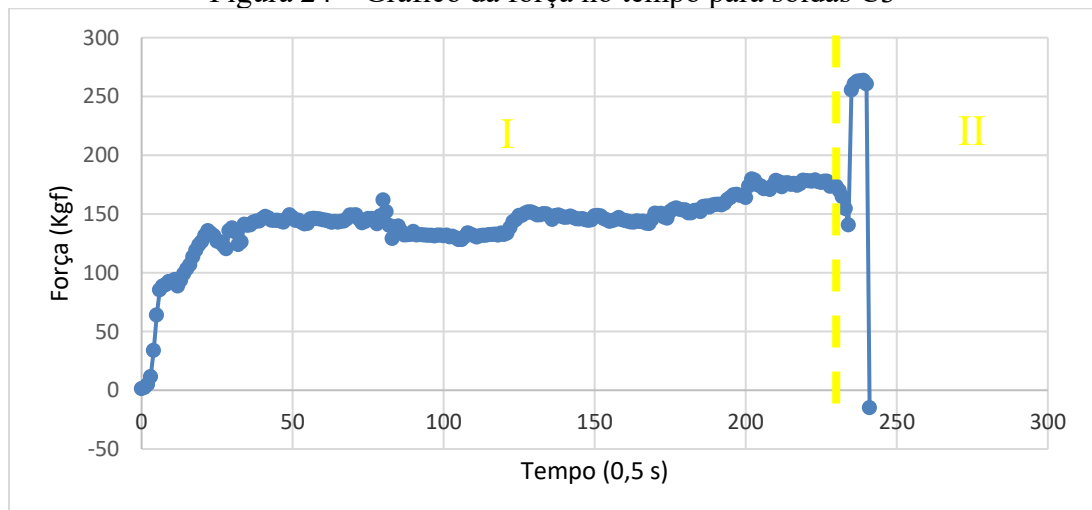
FONTE: Autor (2025).

Figura 23 – Gráfico da força no tempo para solda C2



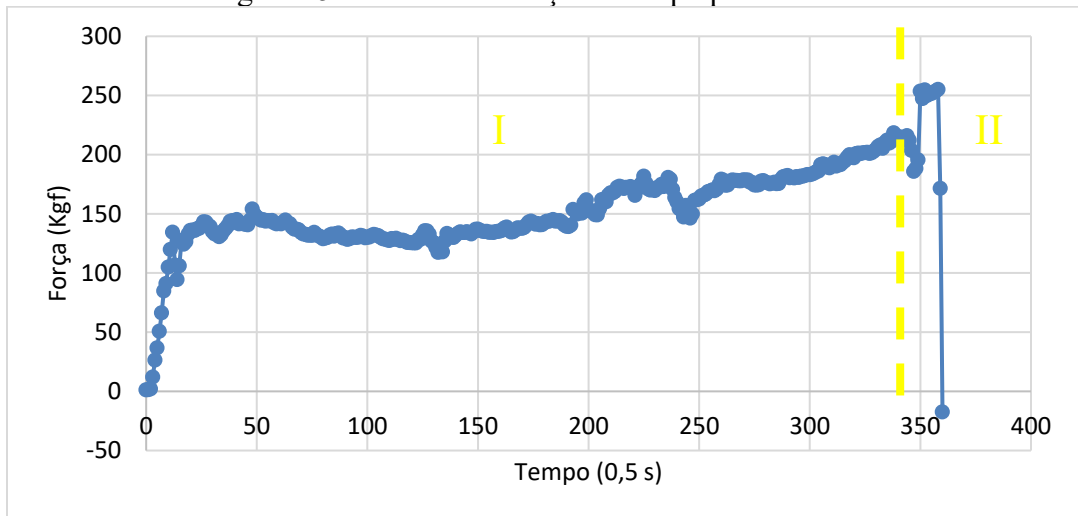
FONTE: Autor, 2025.

Figura 24 – Gráfico da força no tempo para soldas C3



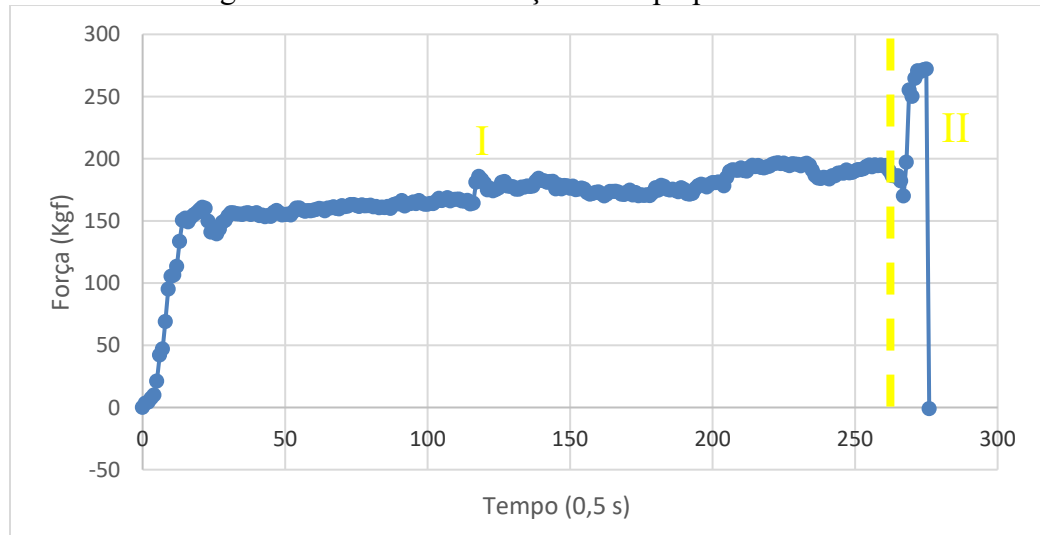
FONTE: Autor (2025).

Figura 25 – Gráfico da força no tempo para solda C4



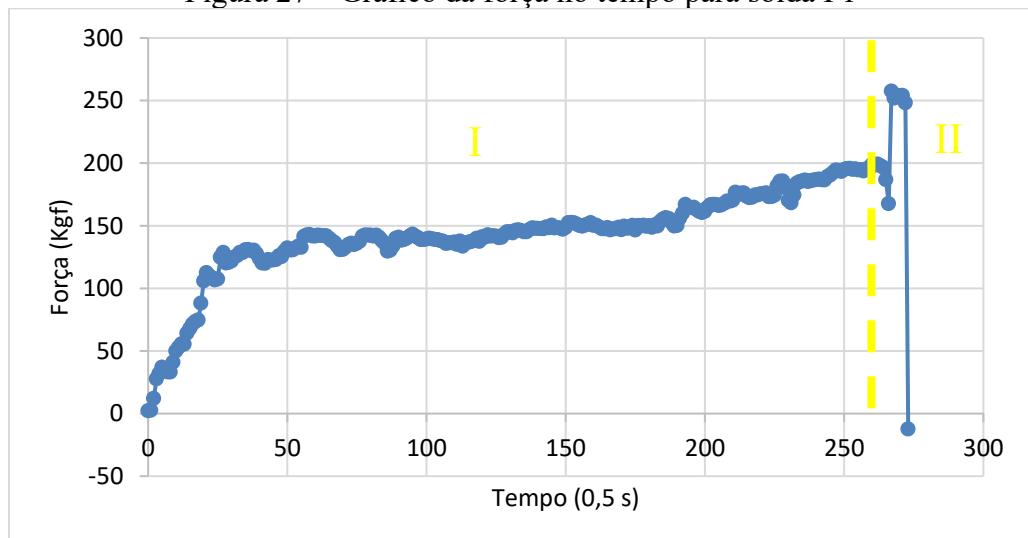
FONTE: Autor (2025).

Figura 26 – Gráfico da força no tempo para solda C5



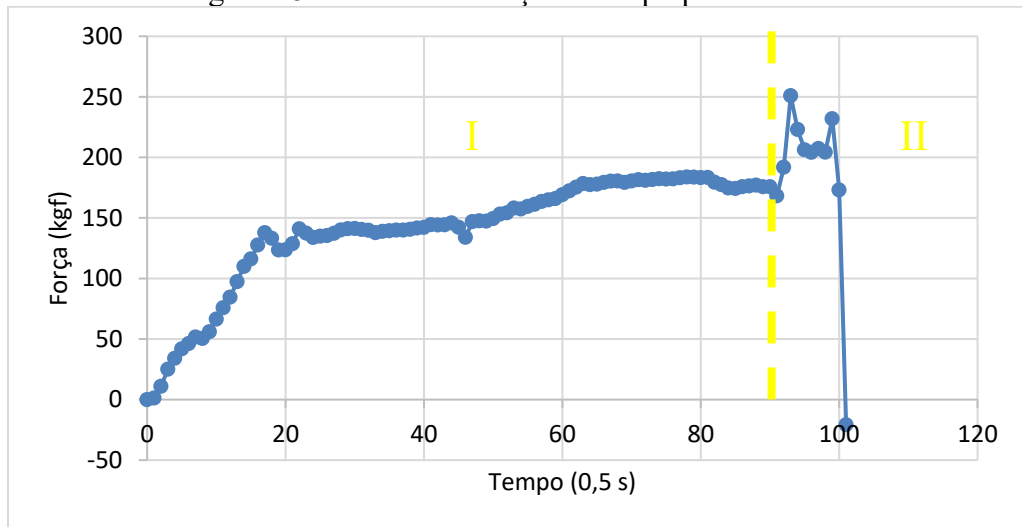
FONTE: Autor (2025).

Figura 27 – Gráfico da força no tempo para solda P1



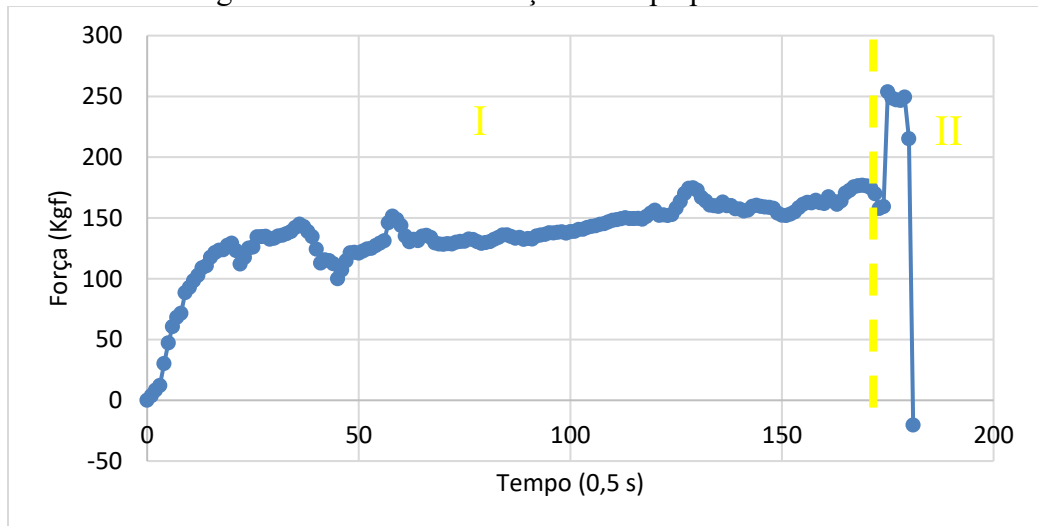
FONTE: Autor (2025).

Figura 28 – Gráfico da força no tempo para solda P2



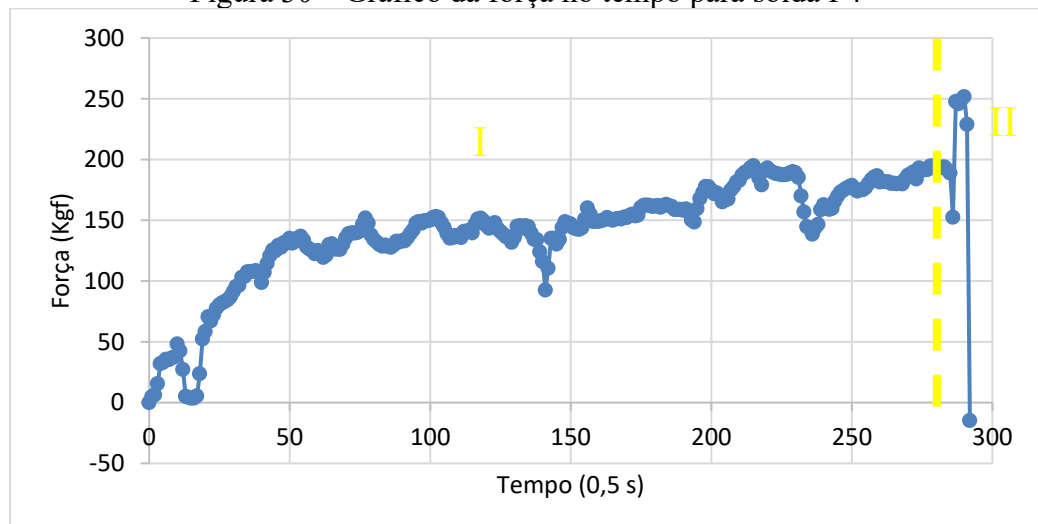
FONTE: Autor (2025).

Figura 29 – Gráfico da força no tempo para solda P3



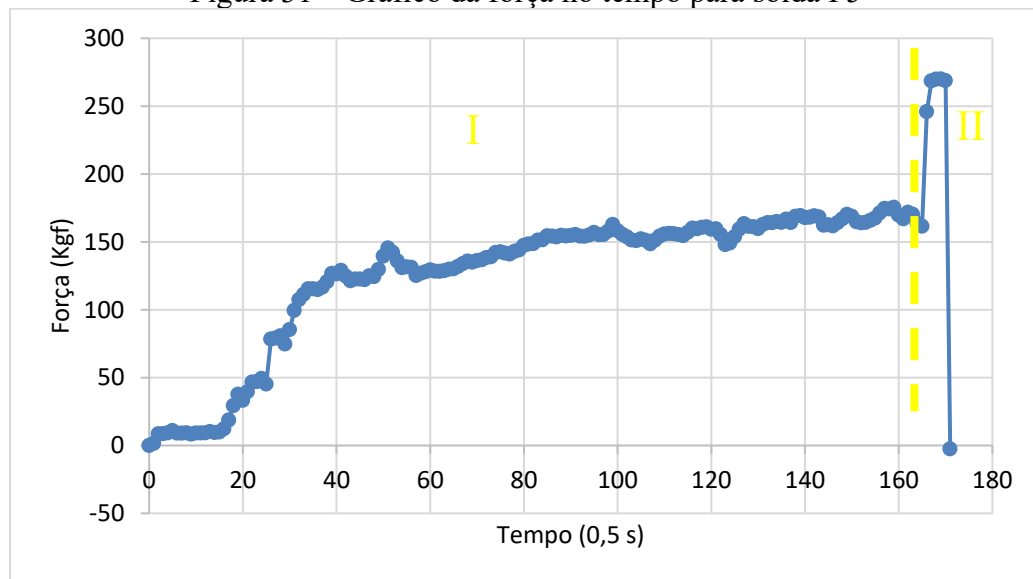
FONTE: Autor (2025).

Figura 30 – Gráfico da força no tempo para solda P4



FONTE: Autor (2025).

Figura 31 – Gráfico da força no tempo para solda P5



FONTE: Autor (2025).

A etapa de fricção foi subdividida em duas fases distintas: tempo de atrito com força aplicada e forjamento. Na primeira fase, representada pela região I nos gráficos, os corpos de prova permaneceram em contato sob rotação, com aplicação de carga. Essa fase durou em torno de 120 segundos. Durante esta fase, o valor de rotação manteve-se praticamente constante e visualizando o gráfico em tempo real, foi controlado para que não mudasse a pressão. Era mantido sobre atrito até que se incandescesse os corpos de prova, o que gerou uma leve variação de tempo entre experimentos.

A etapa seguinte, denominada fase de forjamento, teve início imediatamente após a incandescência do metal e está representada pela região II nos gráficos. Essa fase teve duração de 3 segundos em média, sendo o momento em que a pressão máxima foi atingida.

A análise dos gráficos evidencia que as soldas realizadas com face plana exigiram menor tempo total de processo. Para essa condição, o menor ciclo completo durou entre 50 e 146 segundos, incluindo o forjamento. Por outro lado, as soldas cônicas demandaram entre 100 e 180 segundos.

4.3 Análise visual dos corpos de prova

As soldas de ponta cônica e plana podem ser visualizados nas Figuras 32 à 41.

Figura 32 – Corpos de prova soldados de ponta cônica C1



FONTE: Autor (2025).

Figura 33 – Corpos de prova soldados de ponta cônica C2

A fotografia mostra um corpo de prova cilíndrico de metal, com uma solda de ponta cônica localizada no centro. A solda apresenta uma forma conical típica de soldagem por arco. Uma escala horizontal de 20 mm é exibida na parte inferior esquerda da imagem para referência de tamanho.

FONTE: Autor (2025).

Figura 34 – Corpos de prova soldados de ponta cônica C3



FONTE: Autor (2025).

Figura 35 – Corpos de prova soldados de ponta cônica C4



FONTE: Autor (2025).

Figura 36 – Corpos de prova soldados de ponta cônica C5



FONTE: Autor (2025).

Figura 37 – Corpos de prova soldados de ponta plana P1



FONTE: Autor (2025).

Figura 38 – Corpos de prova soldados de ponta plana P2



FONTE: Autor (2025).

Figura 39 – Corpos de prova soldados de ponta plana P3



FONTE: Autor (2025).

Figura 40 – Corpos de prova soldados de ponta plana P4



FONTE: Autor (2025).

Figura 41 – Corpos de prova soldados de ponta plana P5



FONTE: Autor (2025).

Observa-se que as rebarbas formadas nas diferentes condições de soldagem apresentaram características visuais diferentes, o que que as formas geométricas das pontas alteram as características da solda. Além disso, as soldas obtidas das pontas cônicas resultaram em rebarbas maiores e menores comprimentos finais por apresentarem menos material na ponta, em comparação com as faces planas, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 – Comprimento final dos corpos soldados

Cônico (mm)	Plano (mm)
107,65	113,75
110,25	113,80
109,40	113,20
108,80	113,00
109,30	112,85

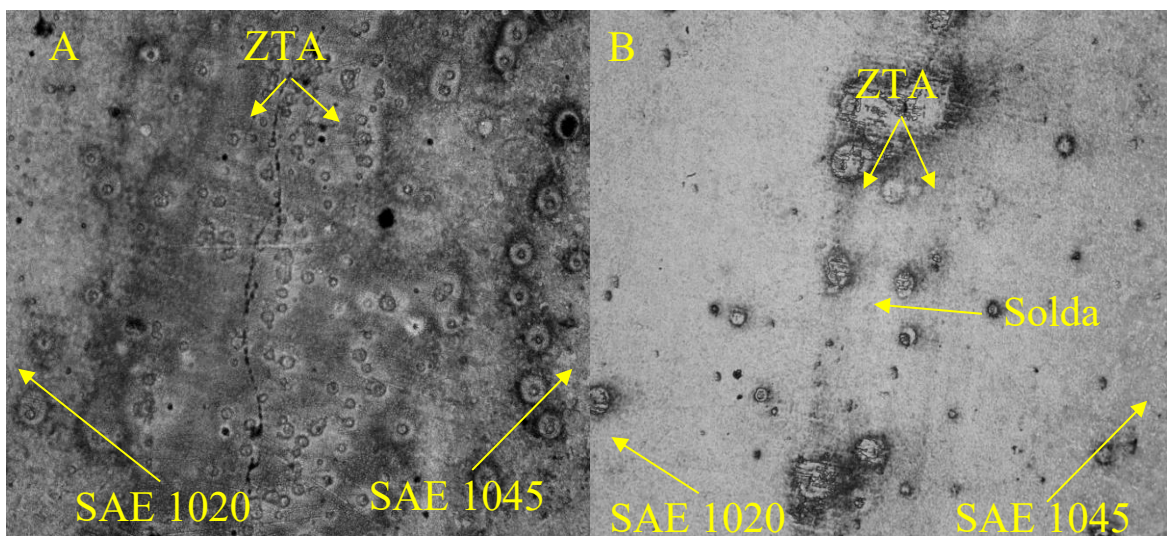
FONTE: Autor (2025).

O tempo de fricção e, por consequência, o tempo total de processo foi maior nas soldas cônicas, o que implica em maior dificuldade em atritar corretamente as faces além de gerar mais calor e deformação.

4.4 Análise microestrutural

A Figura 42 apresenta as fotomicrografias da interface de união entre os aços SAE 1020 e 1045, obtidas em soldas com pontas cônicas (A) e pontas planas (B). Observa-se que a região de interface é marcada por uma linha contínua, acompanhada por pequenos poros e irregularidades, resultantes da mistura mecânica gerada pelo movimento relativo entre as superfícies durante o processo de fricção. Para as soldas planas, não é tão visível a solda nem a ZTA, em comparação com as cônicas.

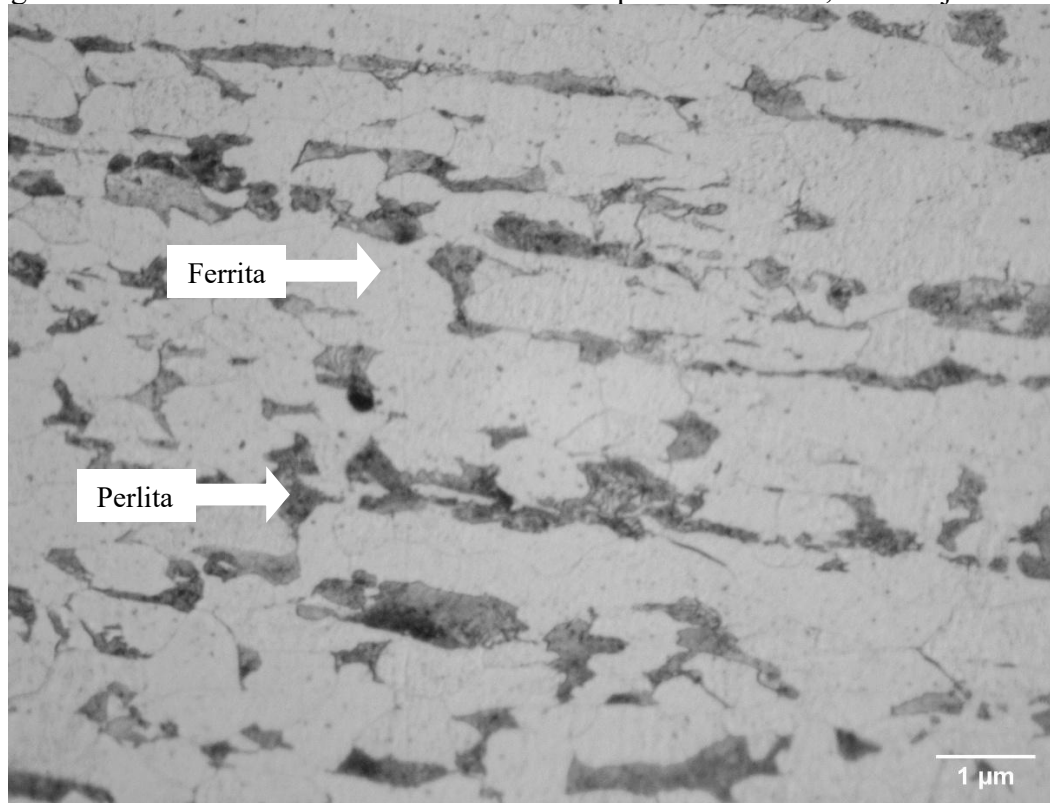
Figura 42 – Fotomicrografia das soldas, lente objetiva 10X



FONTE: Autor (2025).

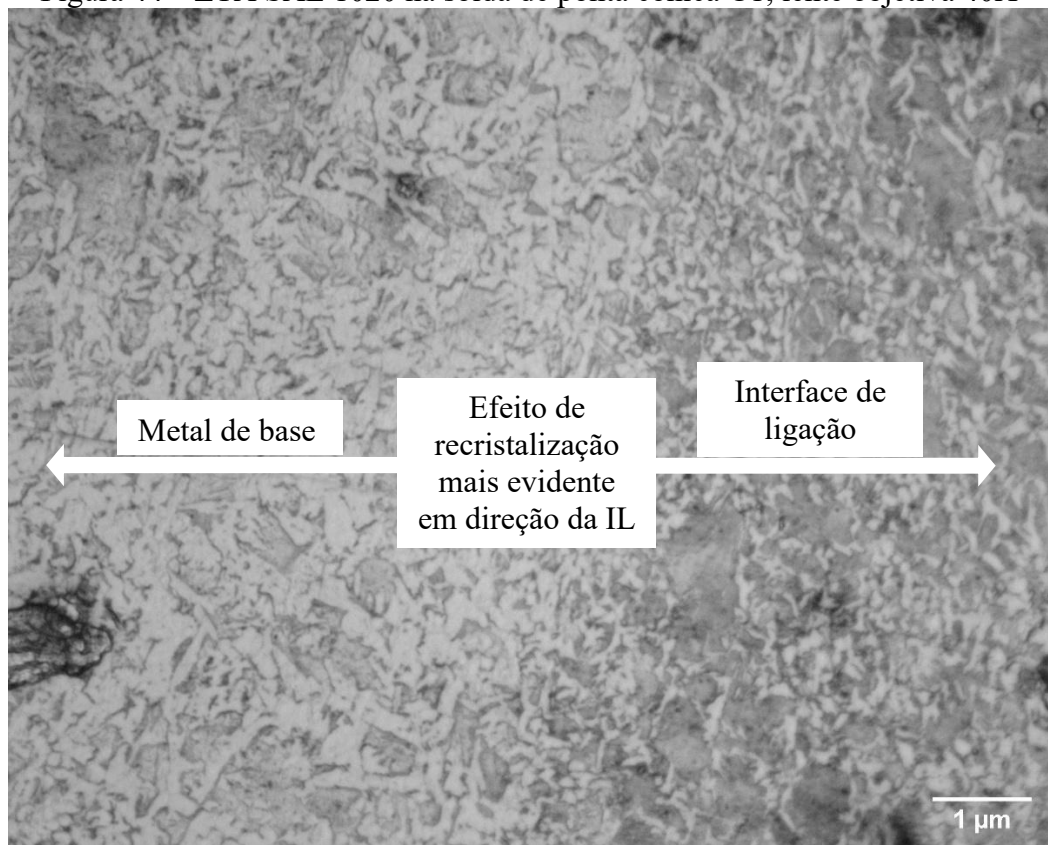
A zona termicamente afetada em ambos os materiais foi diferente, sendo bem maior e mais evidente em solda de pontas cônicas que planas, isso se deve a uma difusão plástica mais porosa, menos uniforme, devido ao menor tempo de atrito necessário, o que gerou maior calor. Tanto no lado do aço SAE 1020 quanto no lado do aço SAE 1045 foram observadas mudanças microestruturais adjacentes à região de ligação. Nas Figuras 43 à 66 é possível ver a transição, retirada no microscópio ótico, para as quatro soldas. Desde o metal de base SAE 1020, ZTA do aço SAE 1020, interface de ligação, ZTA do aço SAE 1045, metal de base SAE 1045 e a zona de fluxo visíveis no aço SAE 1020. Nota-se que há diferenças na qualidade e eficácia na geometria das pontas dos corpos de prova, que é um fator determinante no resultado da soldagem por atrito (Parmar, 2022).

Figura 43 – Metal de base SAE 1020 na solda de ponta cônica C1, lente objetiva 40X



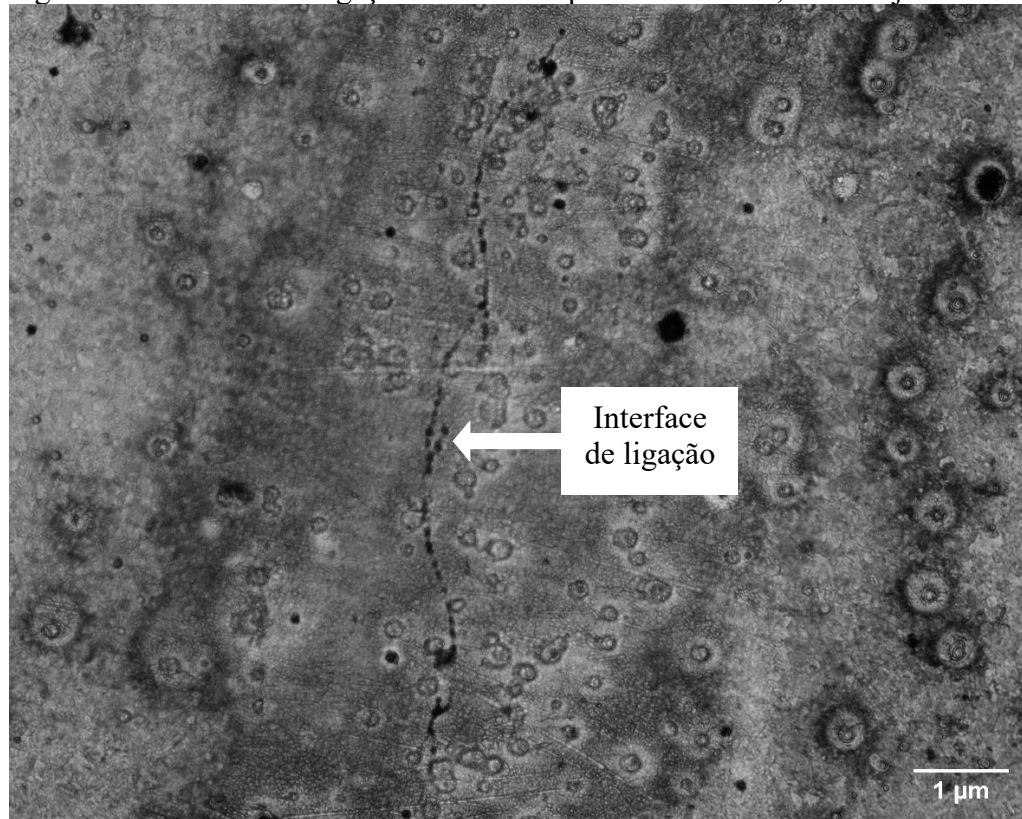
FONTE: Autor (2025).

Figura 44 – ZTA SAE 1020 na solda de ponta cônica C1, lente objetiva 40X



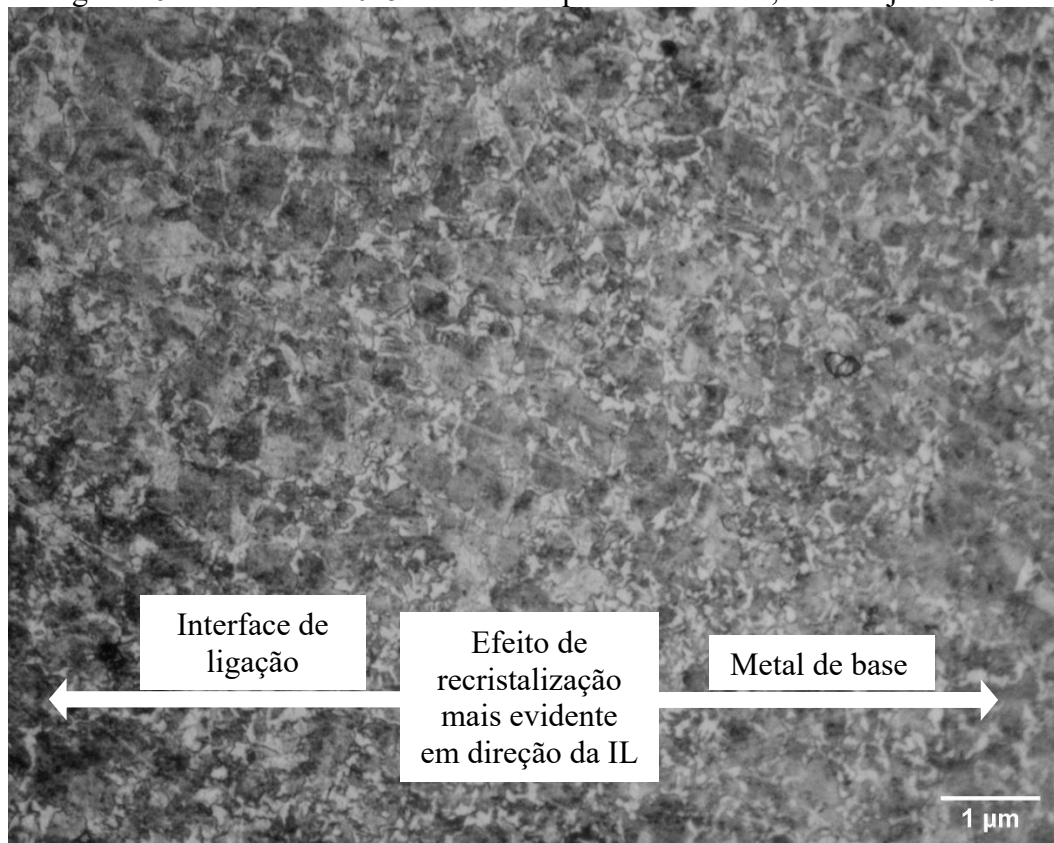
FONTE: Autor (2025).

Figura 45 – Interface de ligação na solda de ponta cônica C1, lente objetiva 10X



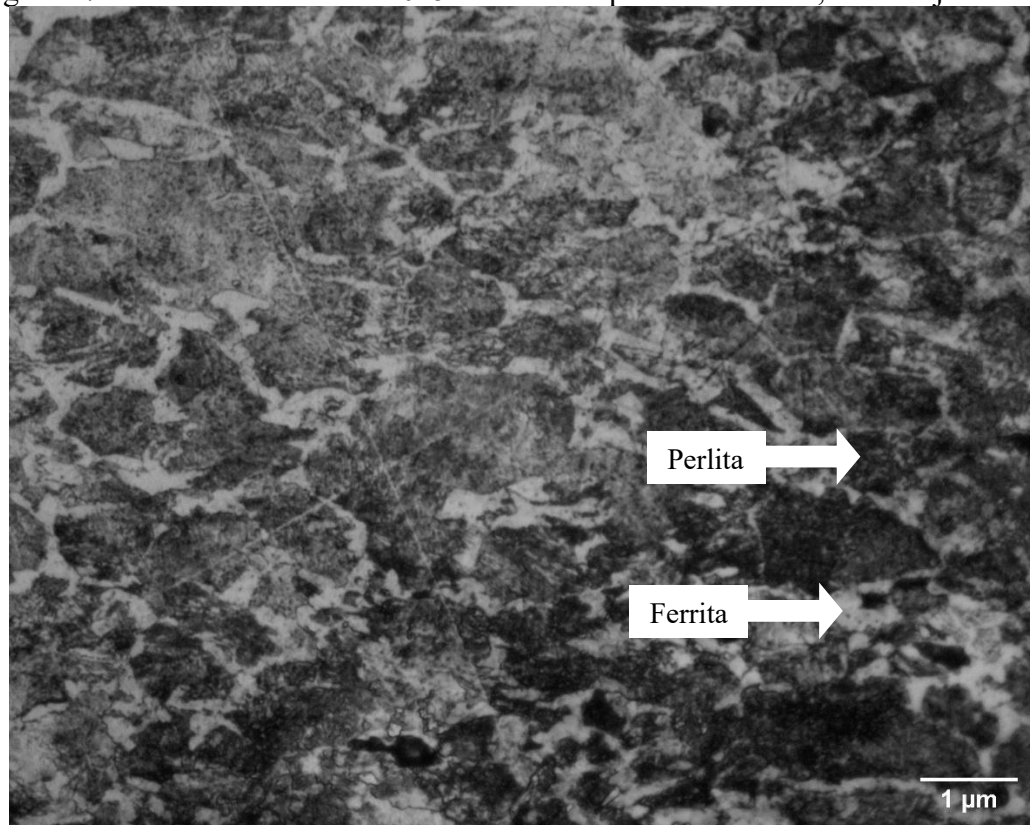
FONTE: Autor (2025).

Figura 46 – ZTA SAE 1045 na solda de ponta cônica C1, lente objetiva 40X



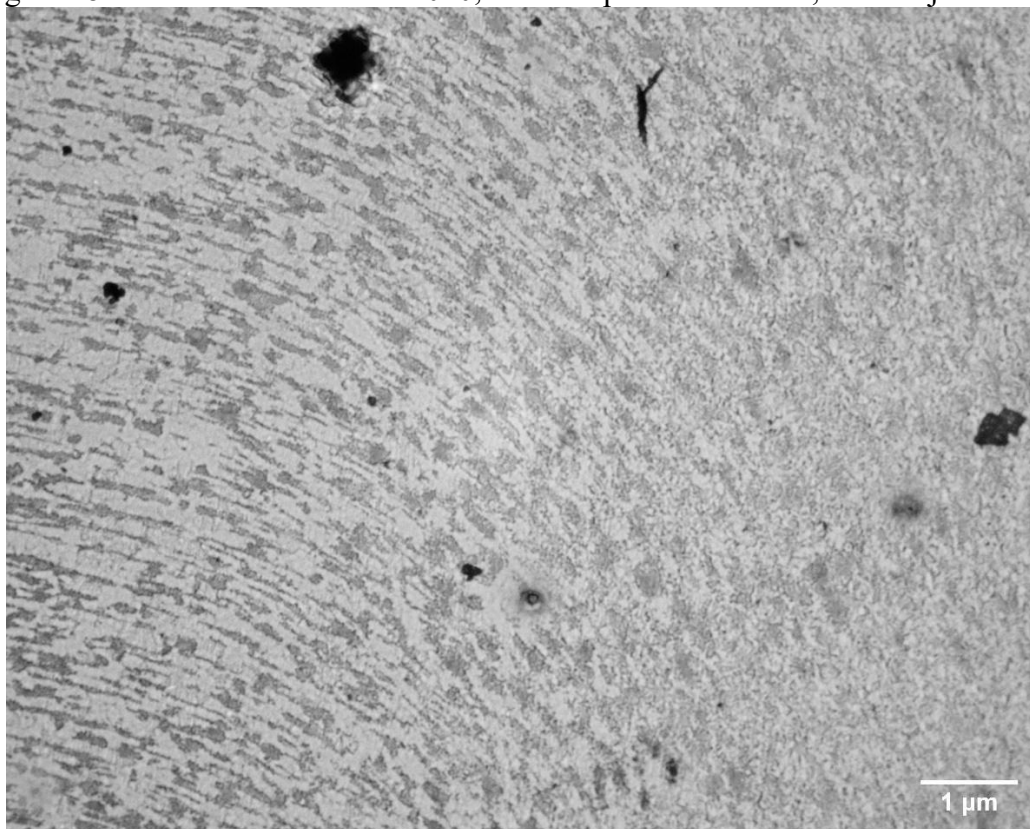
FONTE: Autor (2025).

Figura 47 – Metal de base SAE 1045 na solda de ponta cônica C1, lente objetiva 40X



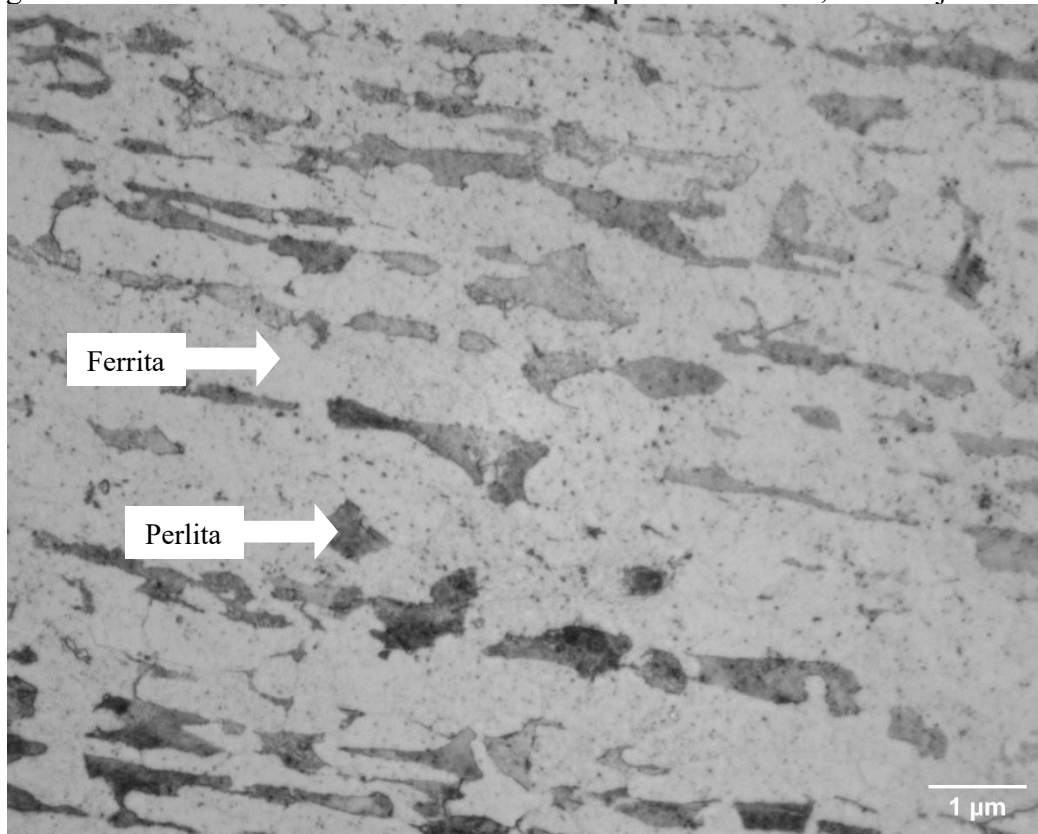
FONTE: Autor (2025).

Figura 48 – Linhas de fluxo SAE 1020, solda de ponta cônica C1, lente objetiva 10X



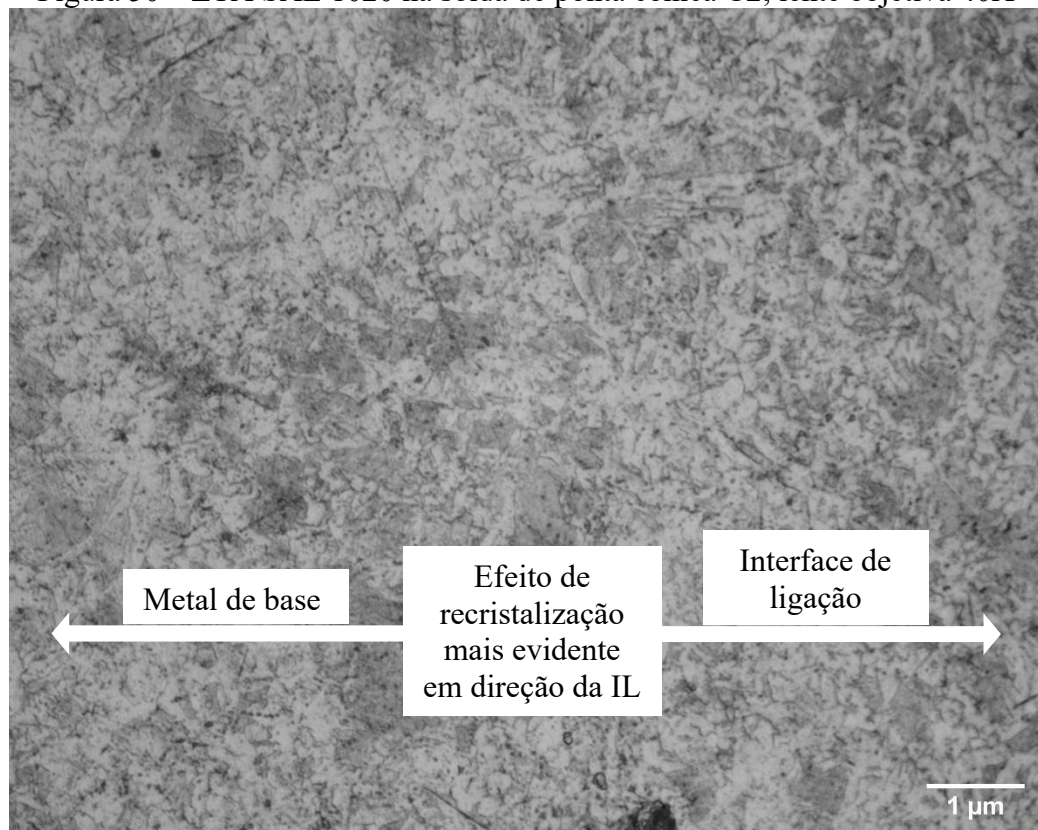
FONTE: Autor (2025).

Figura 49 – Metal de base SAE 1020 na solda de ponta cônica C2, lente objetiva 40X



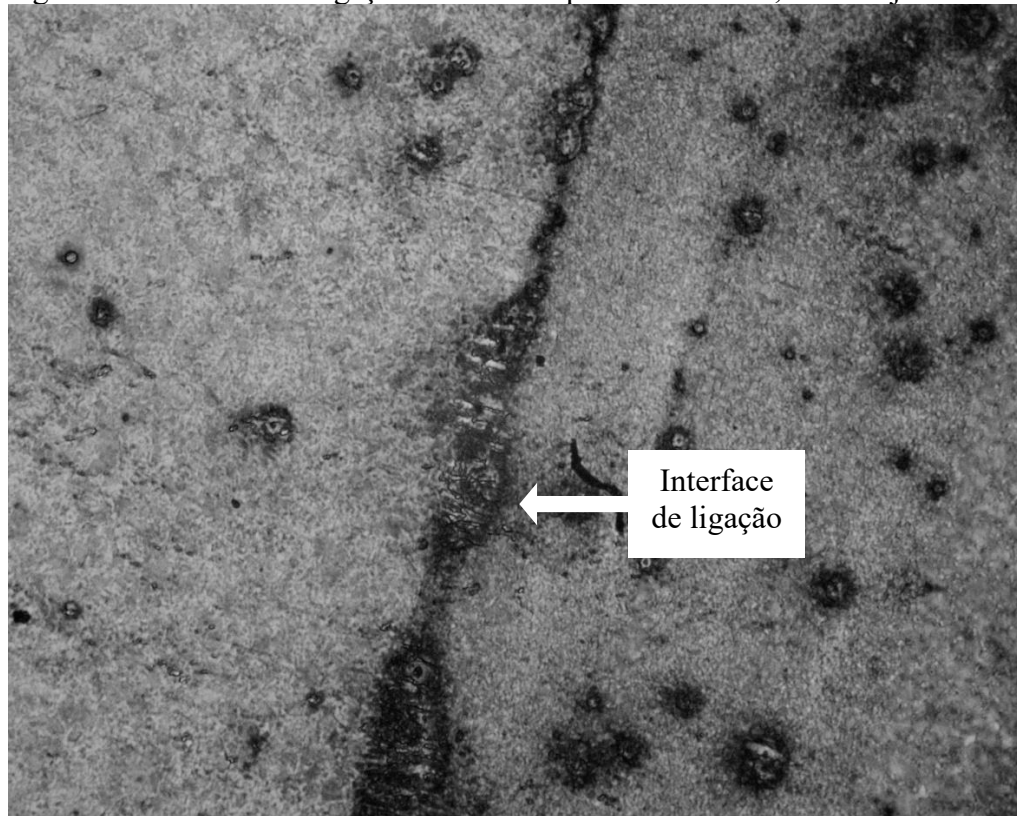
FONTE: Autor (2025).

Figura 50 – ZTA SAE 1020 na solda de ponta cônica C2, lente objetiva 40X



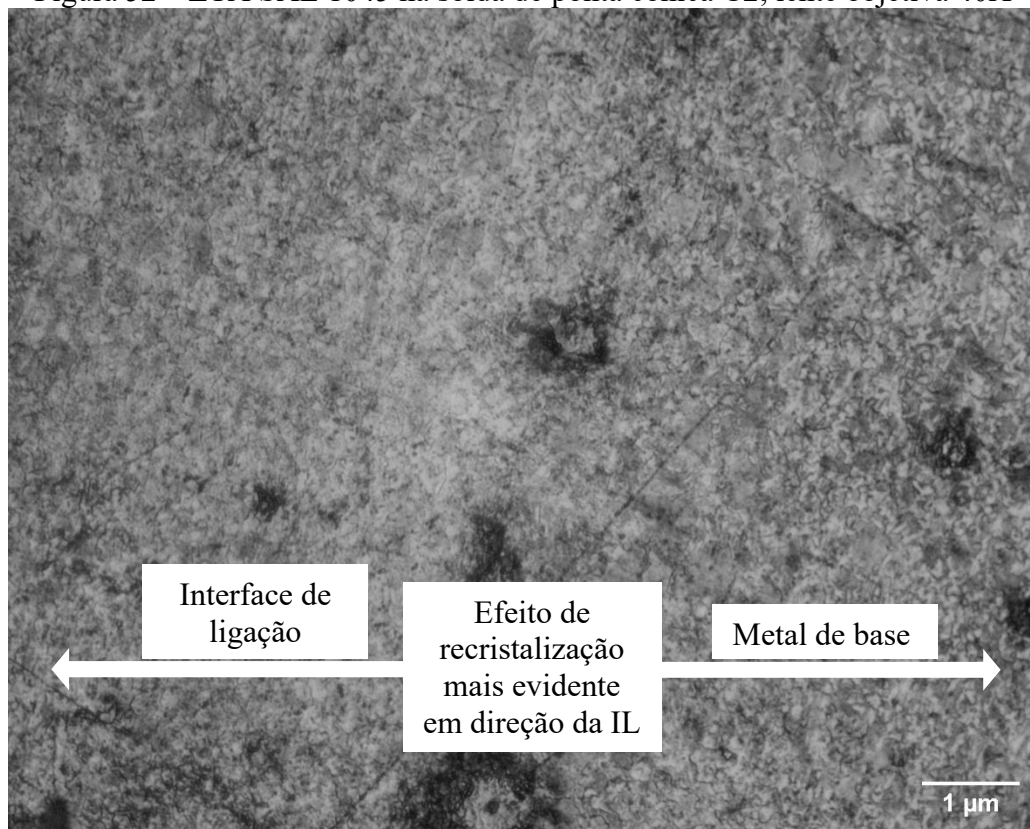
FONTE: Autor (2025).

Figura 51 – Interface de ligação na solda de ponta cônica C2, lente objetiva 10X



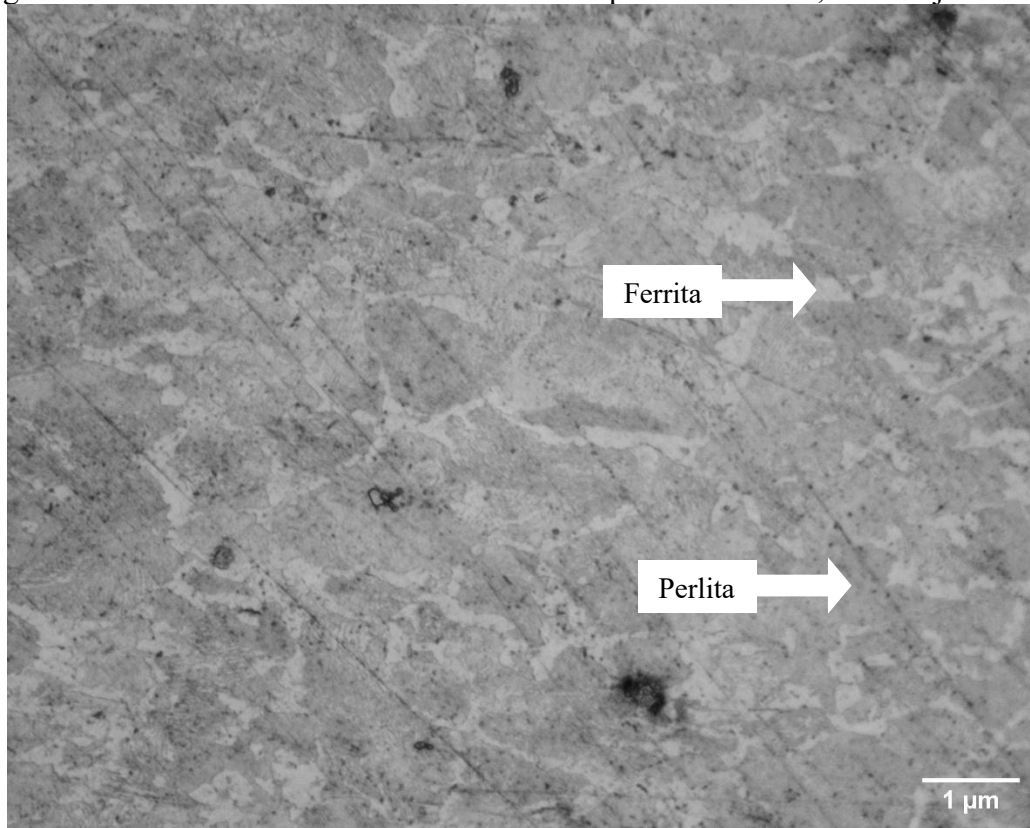
FONTE: Autor (2025).

Figura 52 – ZTA SAE 1045 na solda de ponta cônica C2, lente objetiva 40X



FONTE: Autor (2025).

Figura 53 – Metal de base SAE 1045 na solda de ponta cônica C2, lente objetiva 40X



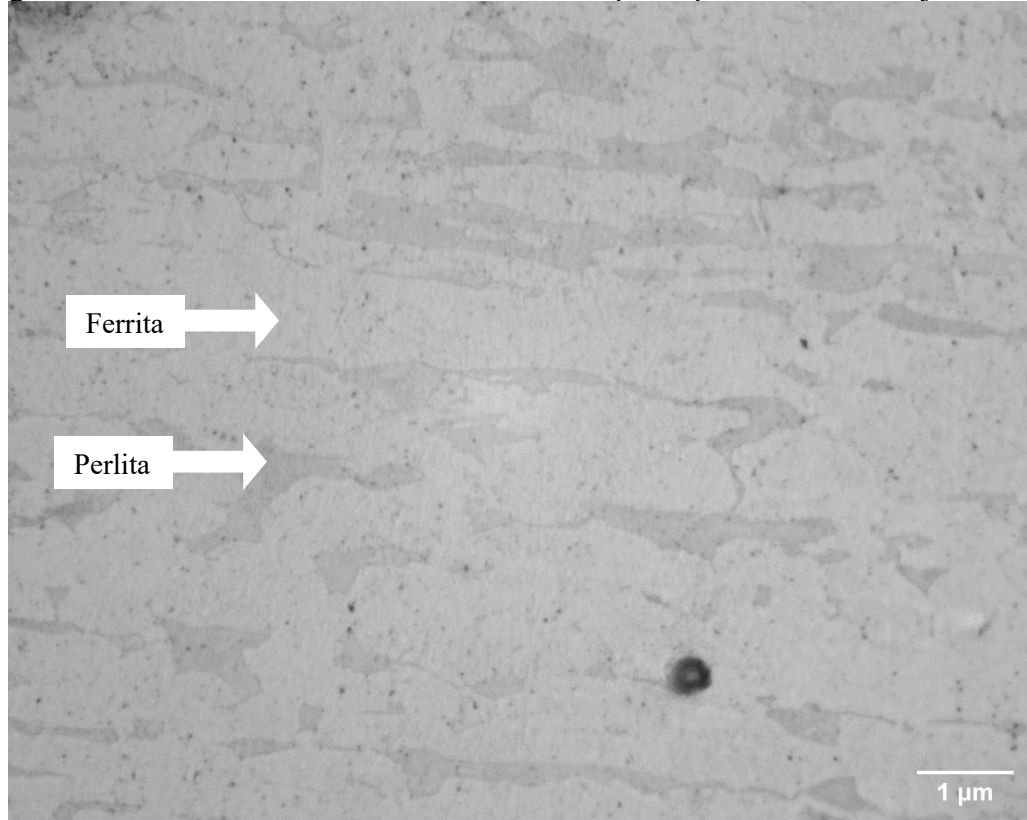
FONTE: Autor (2025).

Figura 54 – Linhas de fluxo SAE 1020, solda de ponta cônica C2, lente objetiva 10X



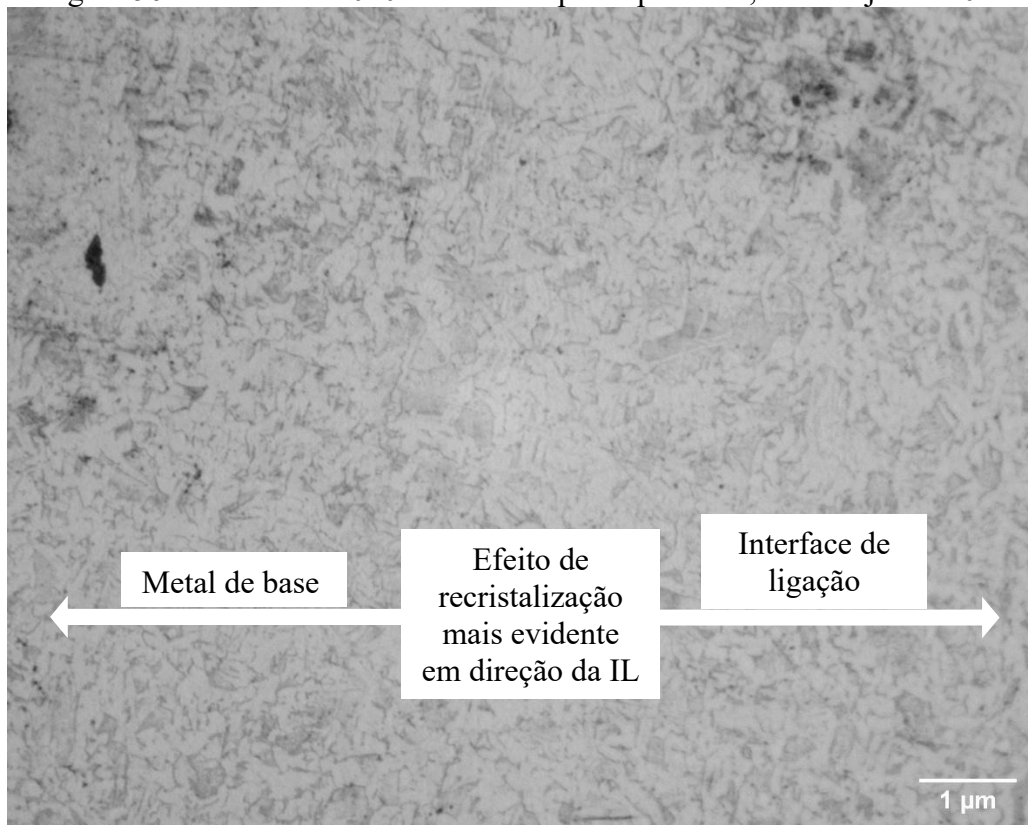
FONTE: Autor (2025).

Figura 55 – Metal de base SAE 1020 na solda de ponta plana P2, lente objetiva 40X



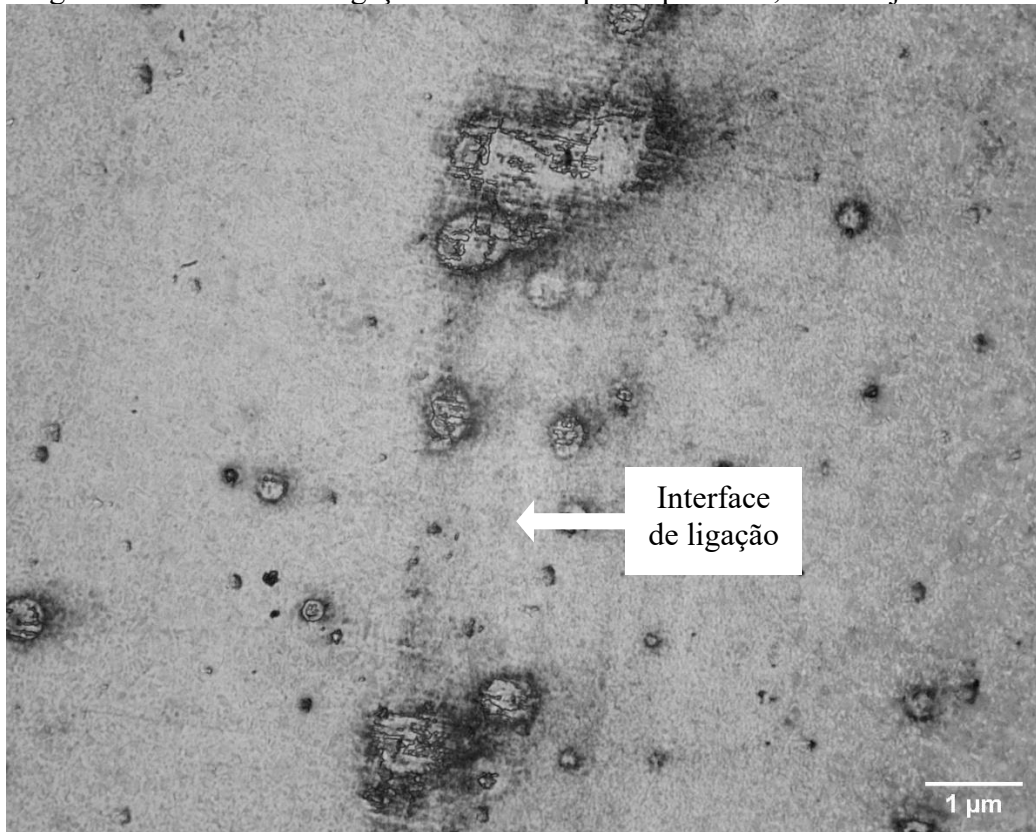
FONTE: Autor (2025).

Figura 56 – ZTA SAE 1020 na solda de ponta plana P2, lente objetiva 40X



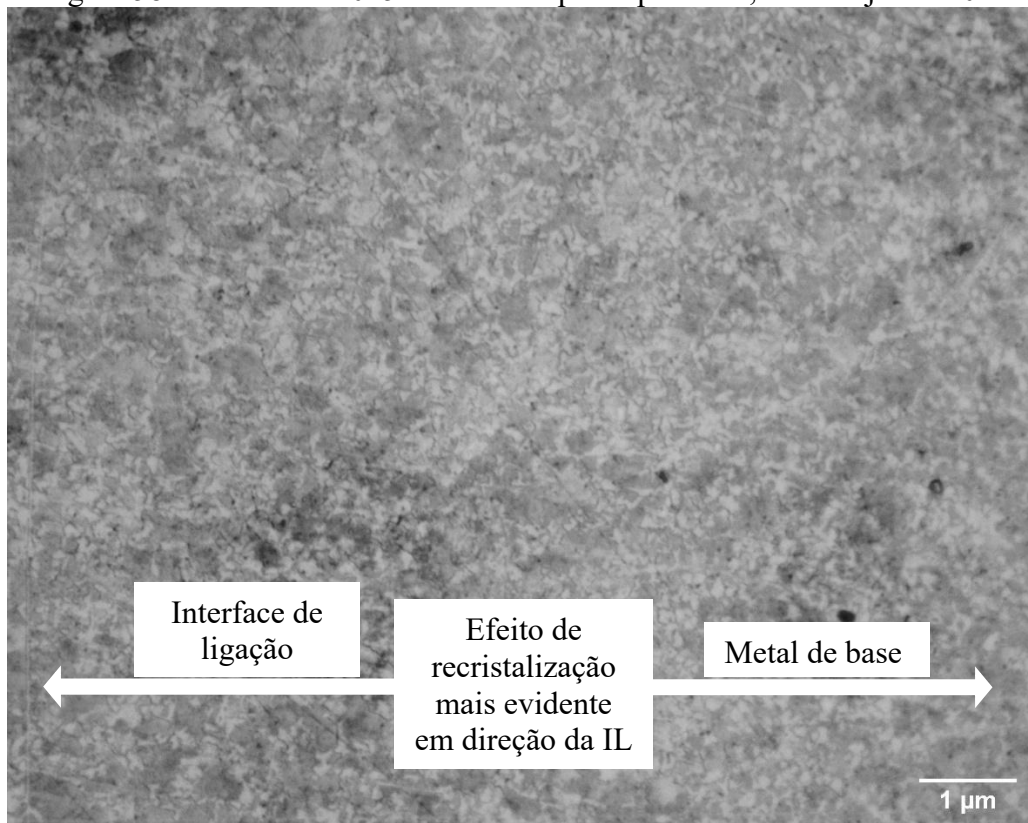
FONTE: Autor (2025).

Figura 57 – Interface de ligação na solda de ponta plana P2, lente objetiva 10X



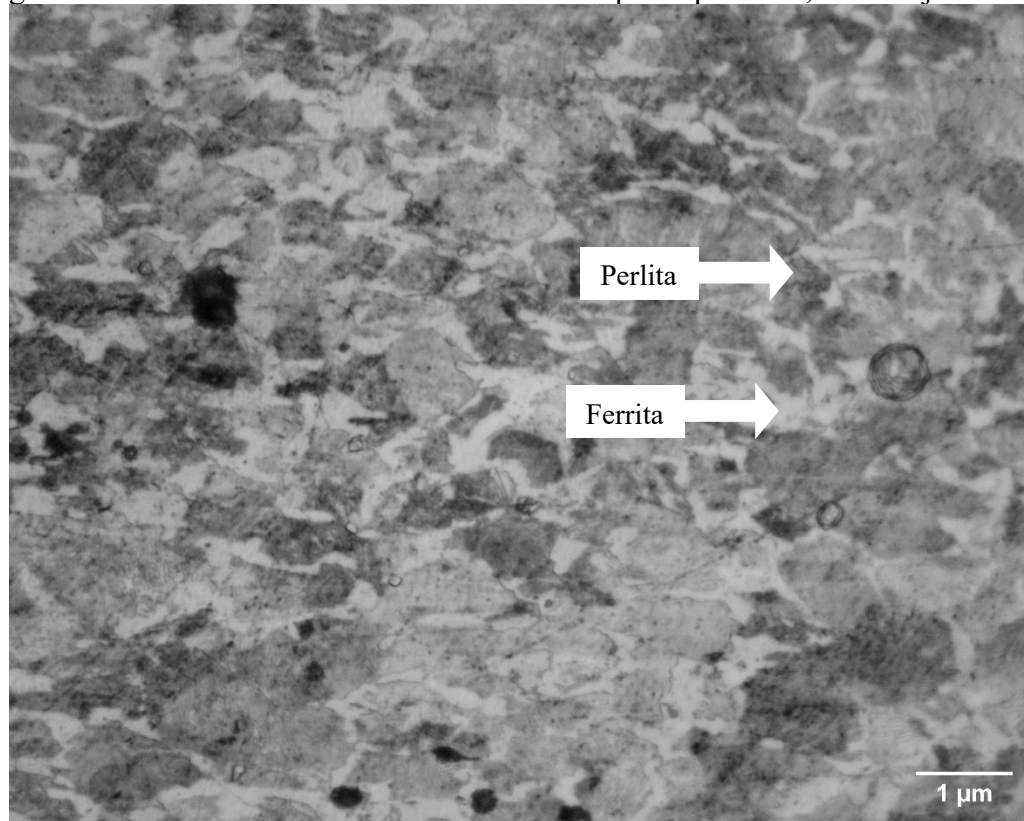
FONTE: Autor (2025).

Figura 58 – ZTA SAE 1045 na solda de ponta plana P2, lente objetiva 40X



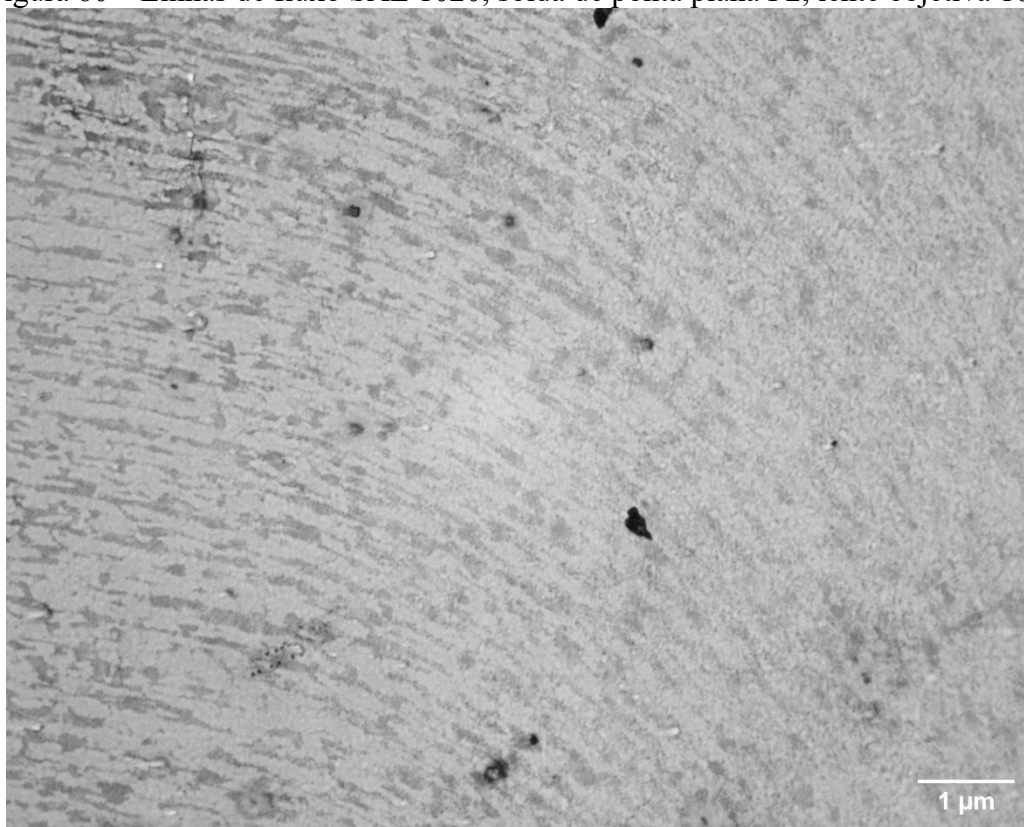
FONTE: Autor (2025).

Figura 59 – Metal de base SAE 1045 na solda de ponta plana P2, lente objetiva 40X



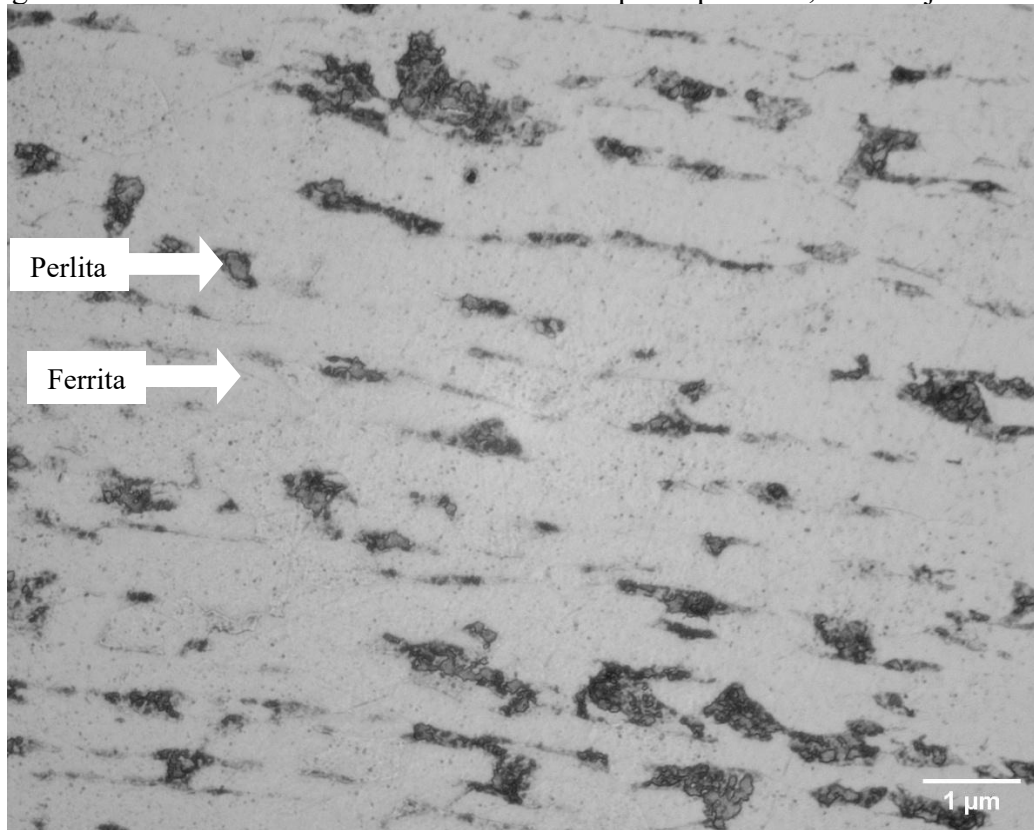
FONTE: Autor (2025).

Figura 60 – Linhas de fluxo SAE 1020, solda de ponta plana P2, lente objetiva 10X



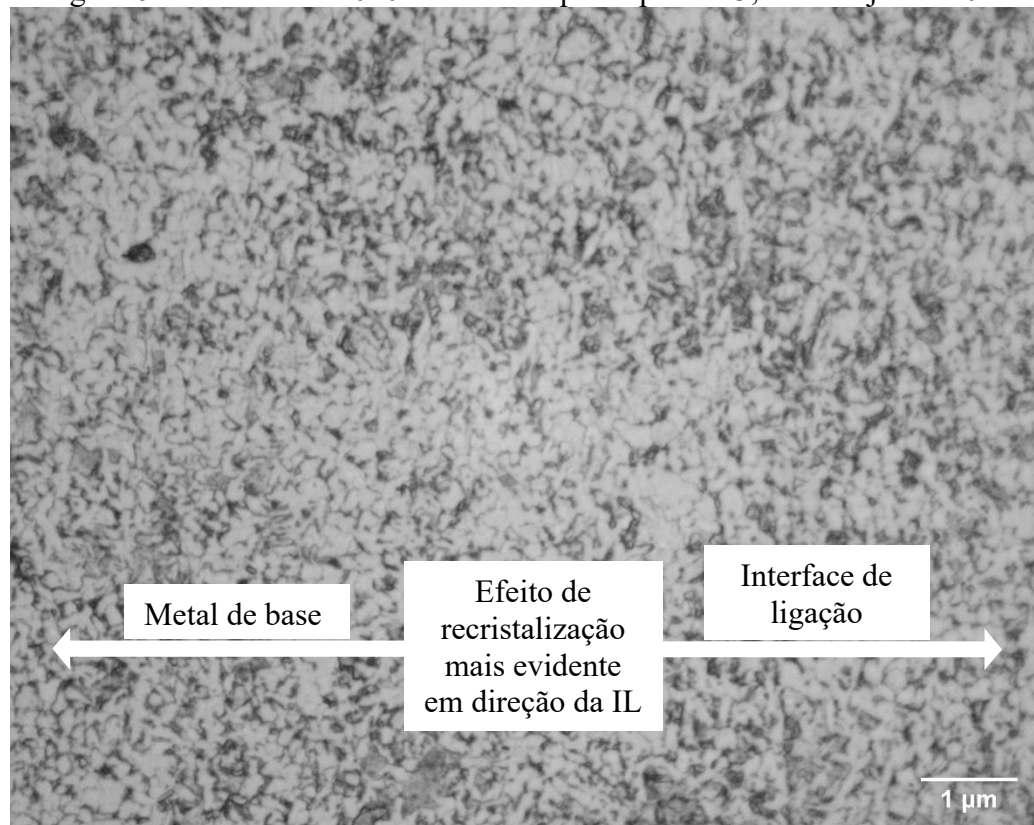
FONTE: Autor (2025).

Figura 61 – Metal de base SAE 1020 na solda de ponta plana P3, lente objetiva 40X



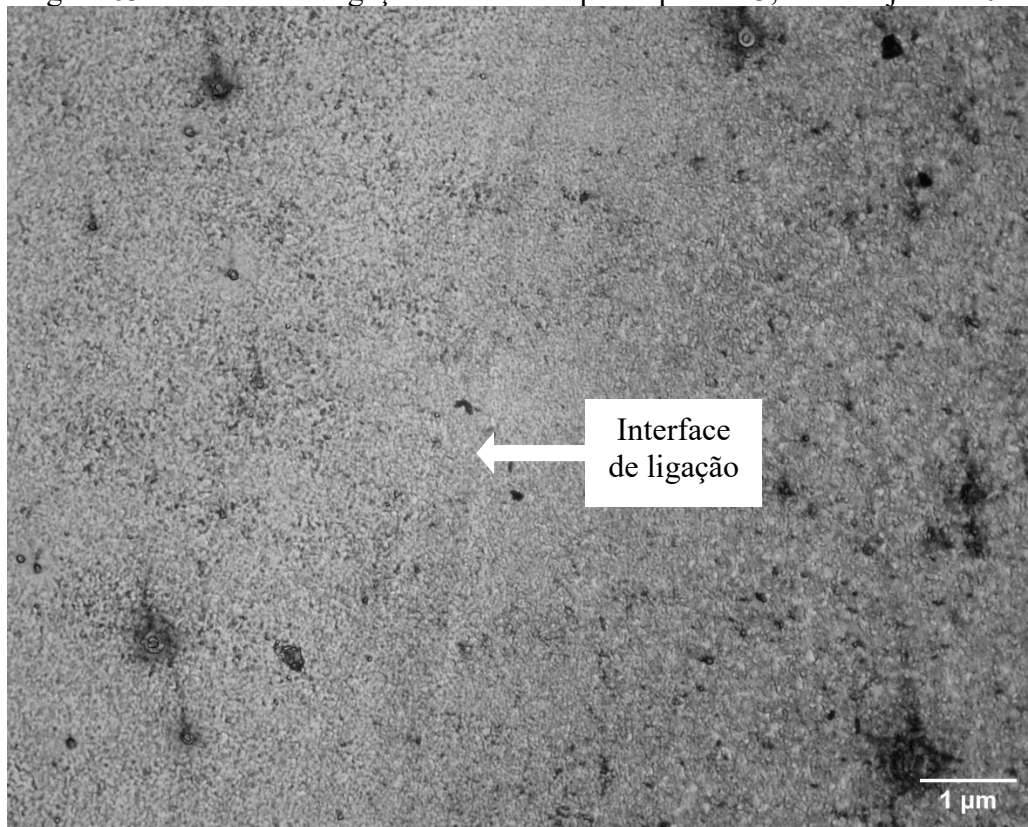
FONTE: Autor (2025).

Figura 62 – ZTA SAE 1020 na solda de ponta plana P3, lente objetiva 40X



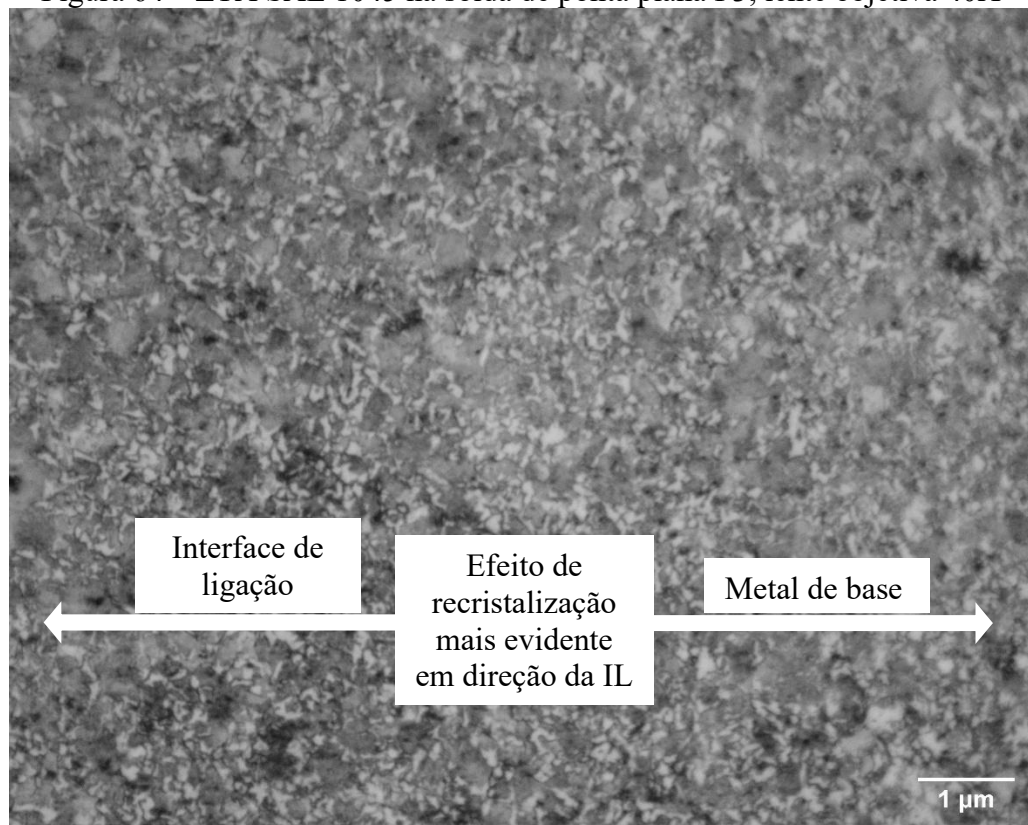
FONTE: Autor (2025).

Figura 63 – Interface de ligação na solda de ponta plana P3, lente objetiva 10X



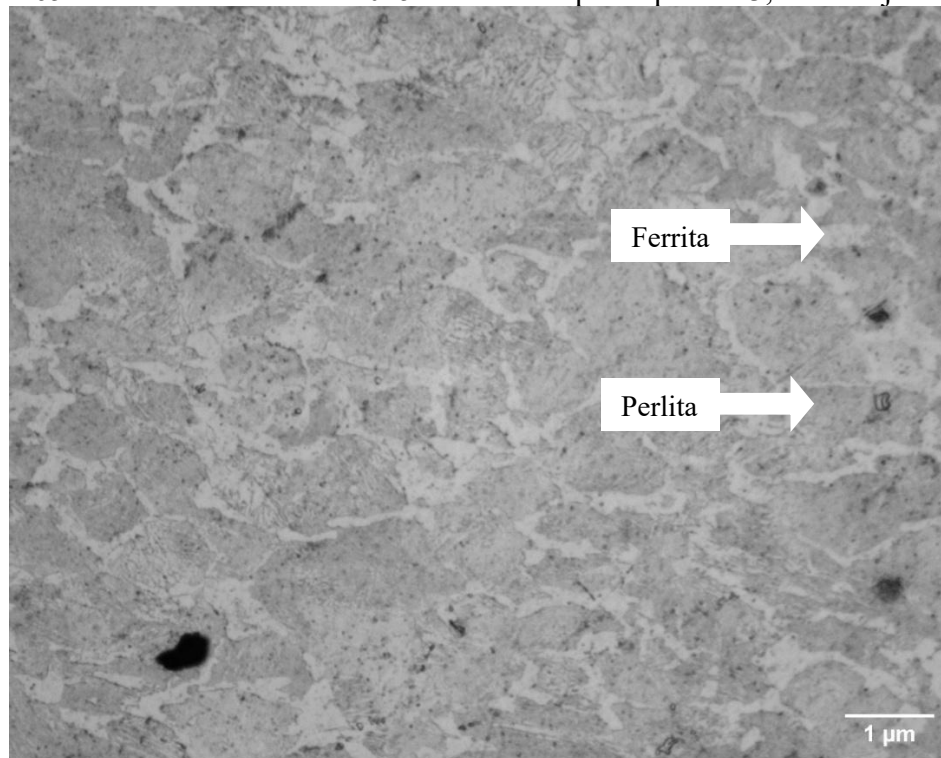
FONTE: Autor (2025).

Figura 64 – ZTA SAE 1045 na solda de ponta plana P3, lente objetiva 40X



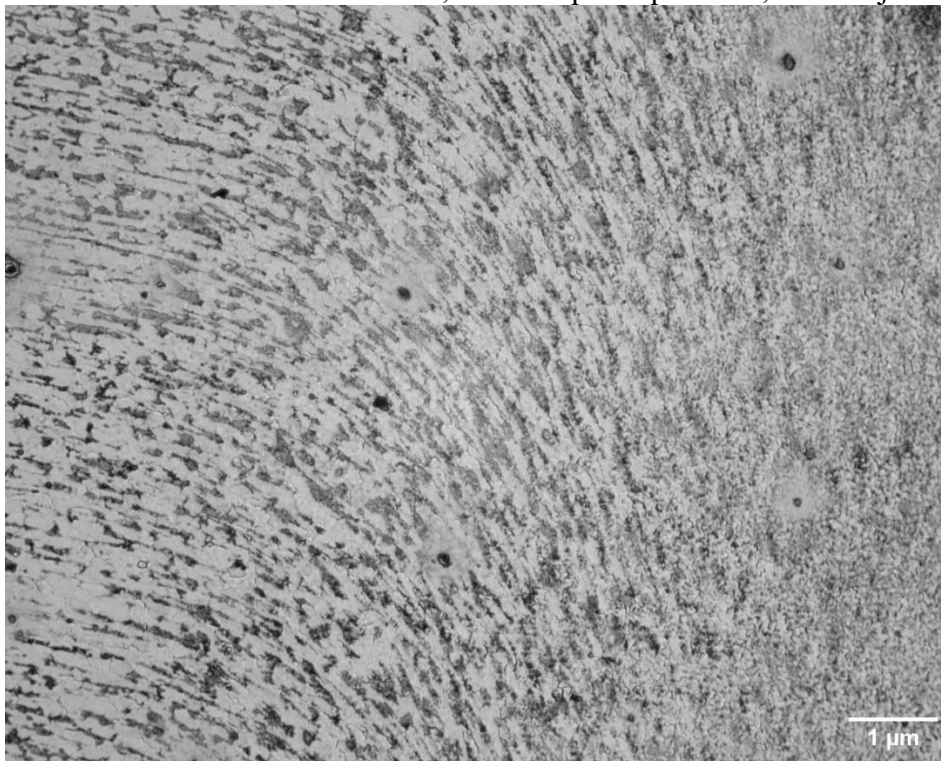
FONTE: Autor (2025).

Figura 65 – Metal de base SAE 1045 na solda de ponta plana P3, lente objetiva 40X



FONTE: Autor (2025).

Figura 66 – Linhas de fluxo SAE 1020, solda de ponta plana P3, lente objetiva 10X



FONTE: Autor (2025).

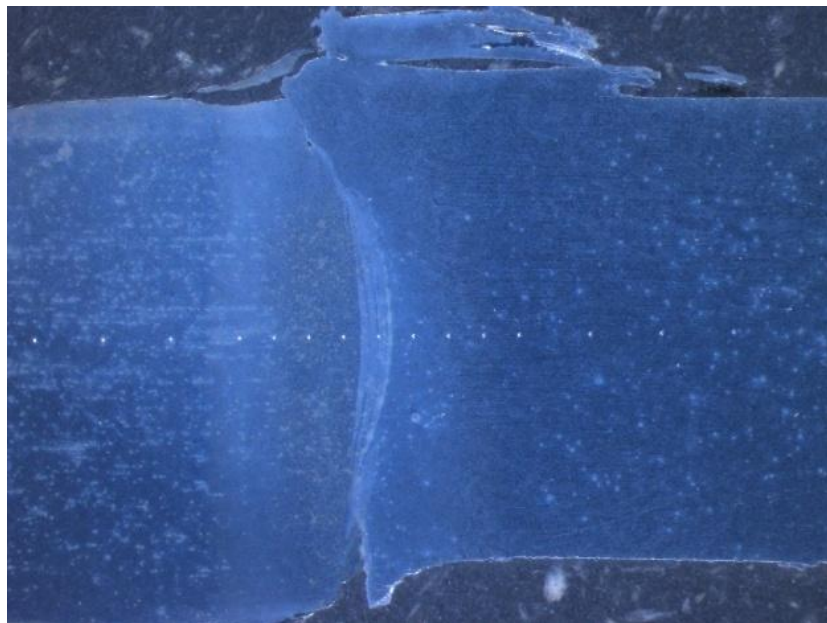
A maior parte da deformação plástica observada, decorrente dos parâmetros de soldagem utilizados, concentrou-se no aço SAE 1020, em razão de sua menor resistência mecânica em comparação ao aço SAE 1045.

4.5 Ensaios mecânicos

4.5.1 Ensaio de microdureza vickers

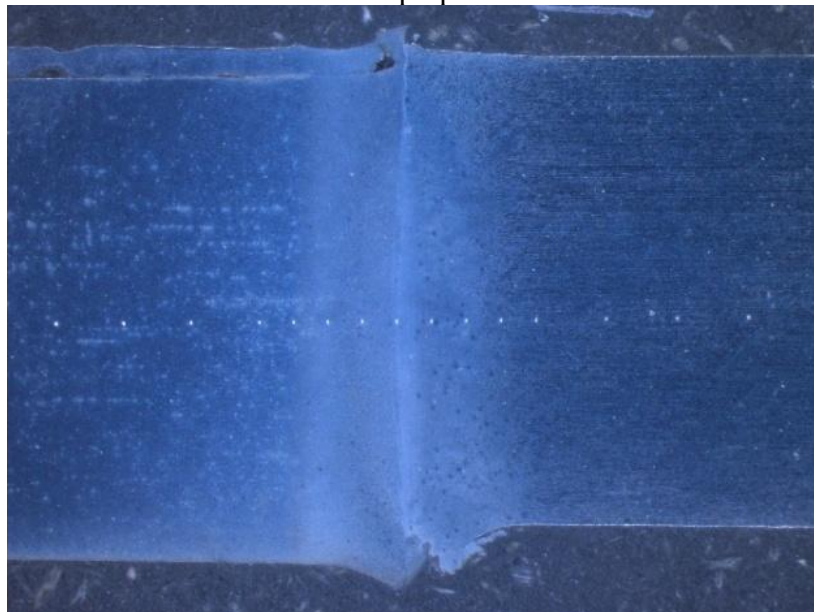
Os perfis de microdureza foram obtidos ao longo do eixo perpendicular à linha de solda, tendo como referência a interface de ligação (IL) entre os corpos de prova. Os valores medidos apresentaram variação heterogêneas ao longo do perfil em ambas as condições de soldagem, conforme ilustrado nas Figuras 67 e 68 para pontas cônicas e planas, respectivamente.

Figura 67 – Perfil de microdureza perpendicular à linha de solda cônica



FONTE: Autor (2025).

Figura 68 – Perfil de microdureza perpendicular à linha de solda cônica



FONTE: Autor (2025).

Na análise do perfil de microdureza nos corpos de prova soldados por fricção, observou-se uma variação significativa nas regiões próximas à interface de ligação, especialmente no lado dos aços SAE 1020 e 1045. Adotando como referência a dureza do metal base do aço SAE 1020 trefilado, com valor médio de entre 190 e 210 HV, foi possível constatar uma redução localizada de dureza na zona afetada termicamente, atribuída ao efeito da entrada de calor e ao alívio de tensões internas. Tal comportamento está relacionado à menor resistência mecânica e à maior ductilidade do SAE 1020, que é mais suscetível à deformação plástica. (Bhadeshia, 2024).

O aço SAE 1045, apresenta uma estrutura inicial predominantemente perlítica e ferrítica, com dureza média em torno de 250 a 300 HV, podendo alcançar valores mais elevados após tratamentos térmicos específicos como a têmpera. No entanto, no contexto da soldagem por fricção, especialmente nas regiões próximas à interface, observou-se uma ligeira elevação na dureza em comparação com o metal base, atribuída à deformação plástica e ao possível refinamento de grão causado pelas elevadas taxas de deformação e aquecimento localizado (ASM International, 1993; Chiaverini, 2008).

Essa variação da dureza ao longo do perfil indica uma combinação entre efeitos térmicos e mecânicos, sendo que a deformação imposta durante a soldagem por fricção contribui para o encruamento e refinamento microestrutural, especialmente no aço de menor resistência, como o SAE 1020. Em ambos os aços, a literatura reforça que fatores como a condutividade térmica, a taxa de resfriamento e o histórico de esforços impostos são determinantes para a distribuição final de dureza (Bhadeshia, 2024).

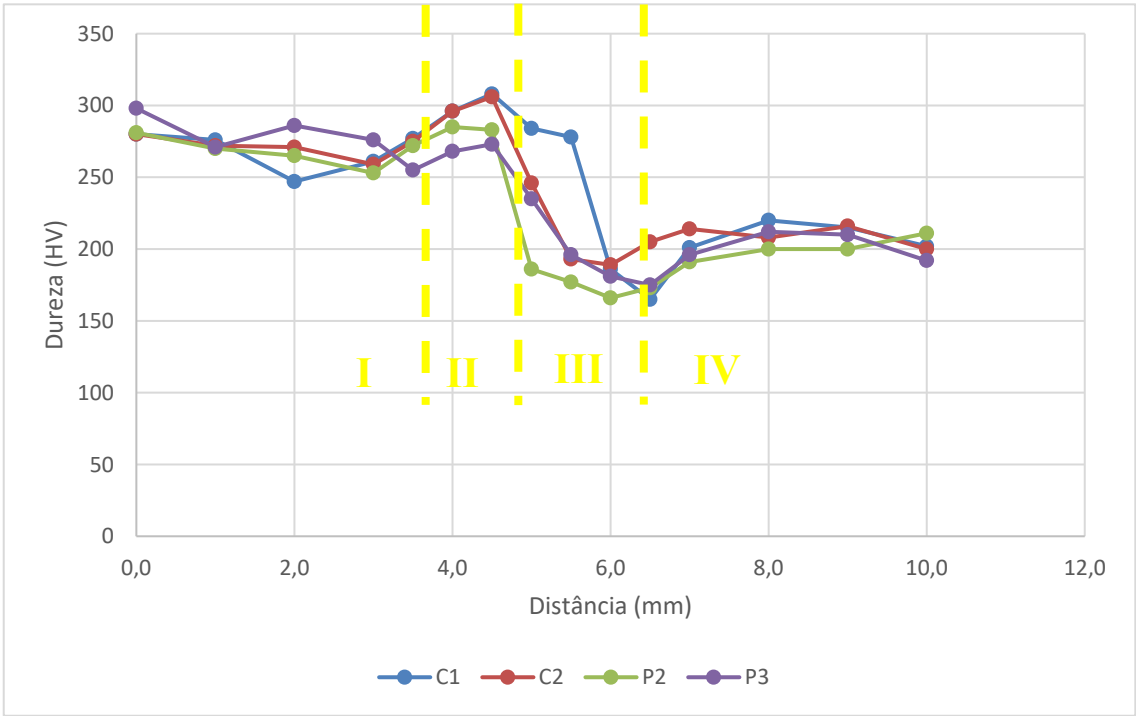
Na Tabela 5 contém os dados de dureza, em relação aos pontos coletados, que partem a aproximadamente 5 mm da solda no aço SAE 1045. Na Figura 69 mostra o gráfico comparativo das durezas de ambos os aços.

Tabela 5 – Dados de dureza em relação aos pontos coletados

Locais de punção		Dureza (HV)			
Ponto	Posição (mm)	C1	C2	P2	P3
x_1	0,0	280	280	281	298
x_2	1,0	276	272	270	271
x_3	2,0	247	271	265	286
x_4	3,0	261	259	253	276
x_5	3,5	277	275	272	255
x_6	4,0	296	296	285	268
x_7	4,5	308	306	283	273
x_8	5,0	284	246	186	235
x_9	5,5	278	193	177	196
x_{10}	6,0	186	189	166	181
x_{11}	6,5	165	205	173	175
x_{12}	7,0	201	214	191	196
x_{13}	8,0	220	208	200	212
x_{14}	9,0	215	216	200	210
x_{15}	10,0	202	200	211	192

FONTE: Autor (2025).

Figura 69 – Perfil de microdureza atravessando a interface de ligação



FONTE: Autor (2025).

Observa-se que, na região do aço SAE 1045 (região I), os valores de dureza permanecem elevados, entre 250 e 310 HV, indicando metal de base. Na região da ZTA do aço SAE 1045 (região II), ocorre um pico de dureza, atribuído à intensa deformação plástica e ao refino de grão na linha de união. Em seguida, na região da ZTA do aço SAE 1020 (região III), há uma queda acentuada da dureza, atingindo valores mínimos próximos de 160 HV, resultado do aquecimento e da recristalização. Na região IV, os valores se estabilizam em uma dureza menor, caracterizando o metal base do SAE 1020. Nota -se a transição entre os materiais, com boa coesão e diferenciação clara entre as zonas afetadas.

4.5.2 Ensaio de tração

As soldas realizadas com ponta cônica apresentaram resistência mecânica menor (52%) em relação às soldas com ponta plana. Na Tabela 6 e Figuras 70 e 71 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de tração para as duas condições de soldagem.

De acordo com a literatura (Akinlabi, 2020), maiores pressões aumentam o contato íntimo entre as superfícies e, conseqüentemente, a adesão entre eles. Contudo, o incremento da pressão nesse trabalho causaria instabilidade no processo, principalmente na castanha do torno que não seguraria a peça e a célula de carga que não suportaria a força, por esse motivo, a pressão não foi aumentada.

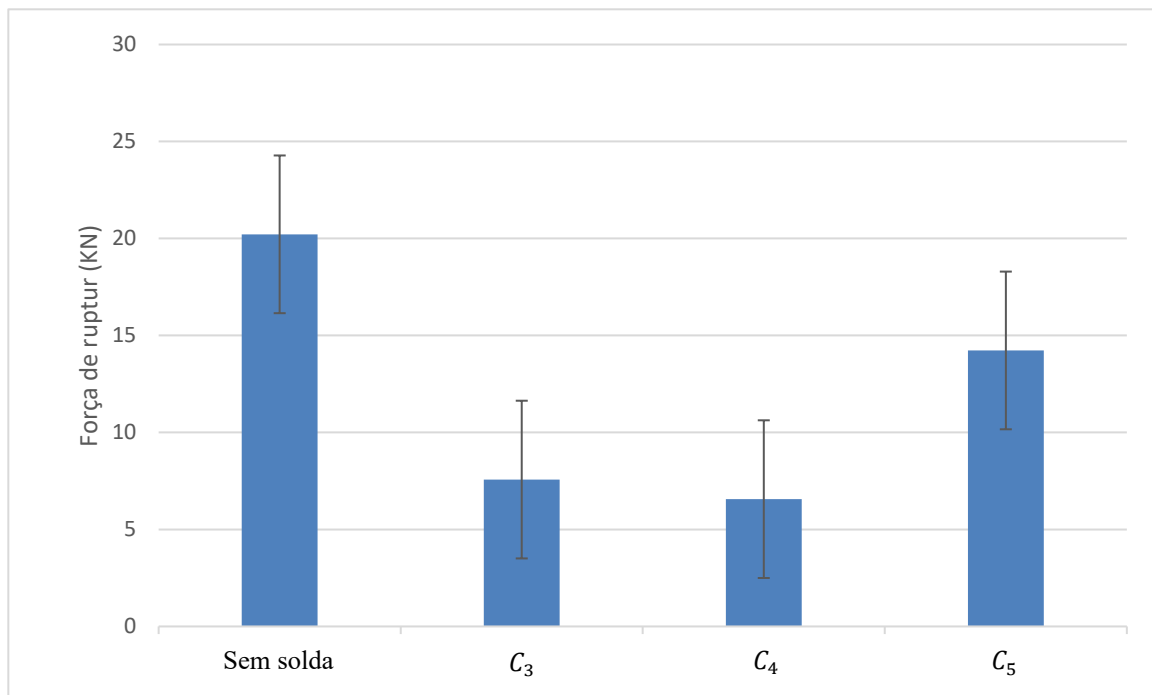
Outro fato que pode justificar a ruptura na interface de ligação é a baixa temperatura (<727 °C) obtida, pois o não foi constatado a formação de martensita através da austenitização, mesmo com rápido resfriamento.

Tabela 6 - Resultados de ruptura obtidos nos ensaios de tração

Amostra	Força de ruptura (N)	Amostra	Força de ruptura (N)
Sem solda	20214	Sem solda	20214
C₃	7571	P₁	21453
C₄	6562	P₄	22789
C₅	14229	P₅	15125
Média Cônica	9454	Média Plana	19789
Desvio Padrão	4165	Desvio Padrão	4094
Resultado	9454 ± 4165 N	Resultado	19789 ± 4094 N

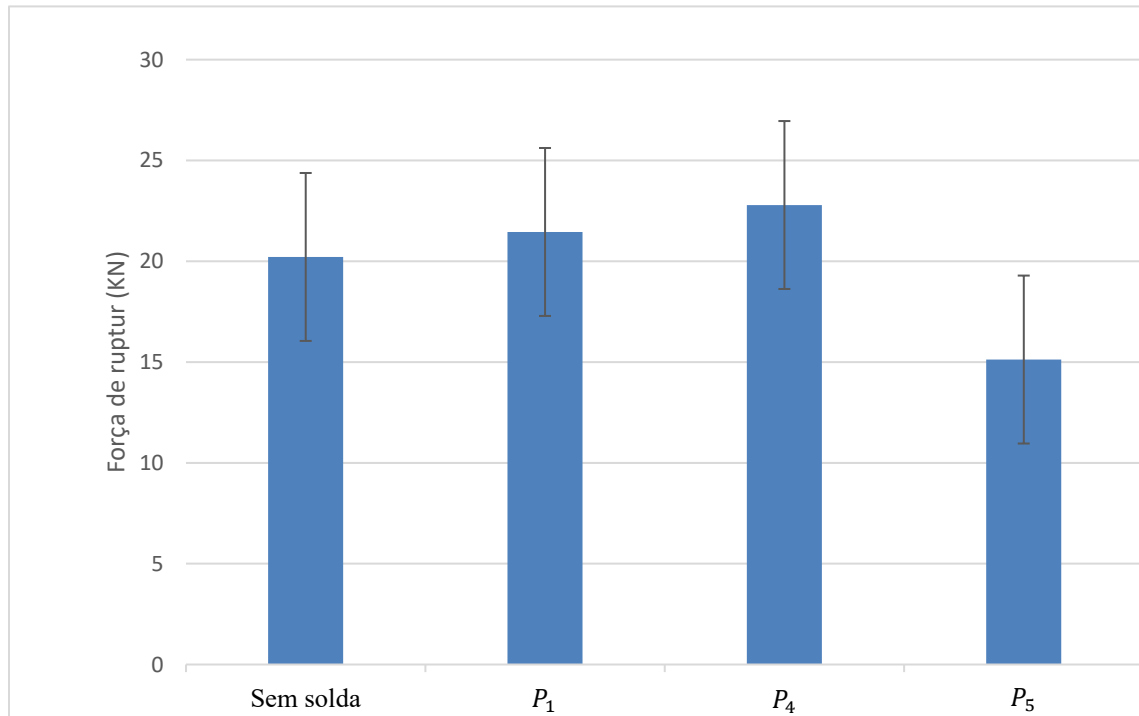
FONTE: Autor (2025).

Figura 70 – Força de ruptura das soldas com pontas cônicas



FONTE: Autor (2025).

Figura 71 – Força de ruptura das soldas com pontas planas



FONTE: Autor (2025).

Embora as soldas de ponta plana tenham apresentado maior resistência mecânica em comparação com as soldas de ponta cônica, o resultado de desvio padrão ficou próximo em ambos evidenciando a repetibilidade do processo.

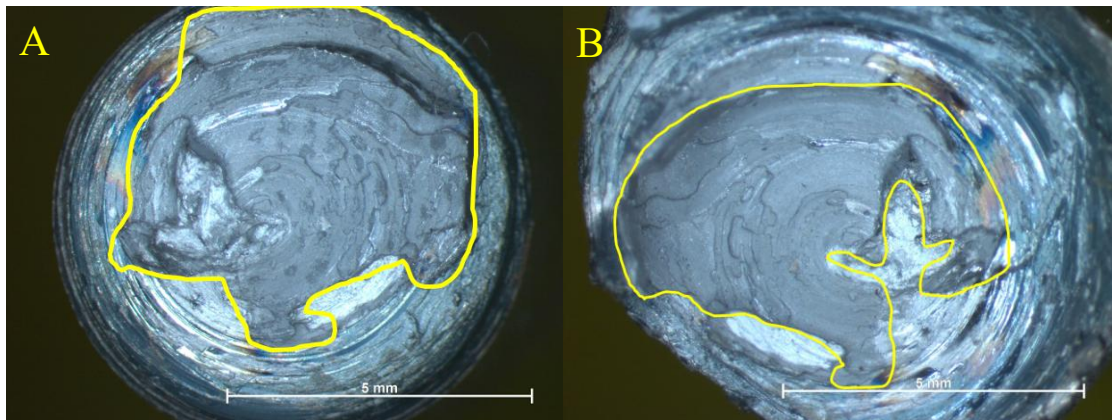
Nas Figuras 72 a 77 é apresentada as superfícies de fratura dos corpos de prova de tração, onde a região circulada em amarelo representa a área efetivamente soldada. Nos corpos de prova com pontas cônicas, a área efetiva de contato inicial é maior, o que resulta em um processo de aquecimento e deformação mais amplo. Essa configuração tende a gerar uma plastificação e mistura mecânica e difusão entre os materiais na interface, entretanto a qualidade da solda ficou de menor qualidade. A evidência dessa limitação é visível na micrografia pela menor presença de regiões acinzentadas, típicas de zonas altamente deformadas ou com maior integração metalúrgica, além de maior porosidade vistas nas imagens do microscópio.

Por outro lado, os corpos com pontas planas apresentam uma superfície de contato menor desde o início do processo de fricção. Isso promove uma distribuição mais uniforme da temperatura e da pressão na interface, favorecendo uma deformação plástica mais intensa e uma maior mistura mecânica entre os materiais. A maior extensão da área acinzentada observada nessas amostras é indicativa de maior interação metalúrgica e o que contribui para o aumento da coesão na interface, além de menor porosidade vistas nas imagens do microscópio.

Como resultado dessas diferenças no comportamento, os corpos com ponta plana demonstraram maiores forças de ruptura nos ensaios de tração. Isso se justifica pela formação de uma zona de ligação mais ampla e robusta, com maior envolvimento das microestruturas adjacentes à interface. A geometria plana, portanto, favorece não apenas a transmissão mais eficiente da carga durante o processo de soldagem, mas também proporciona melhores condições para a formação de uma junta com superior desempenho mecânico.

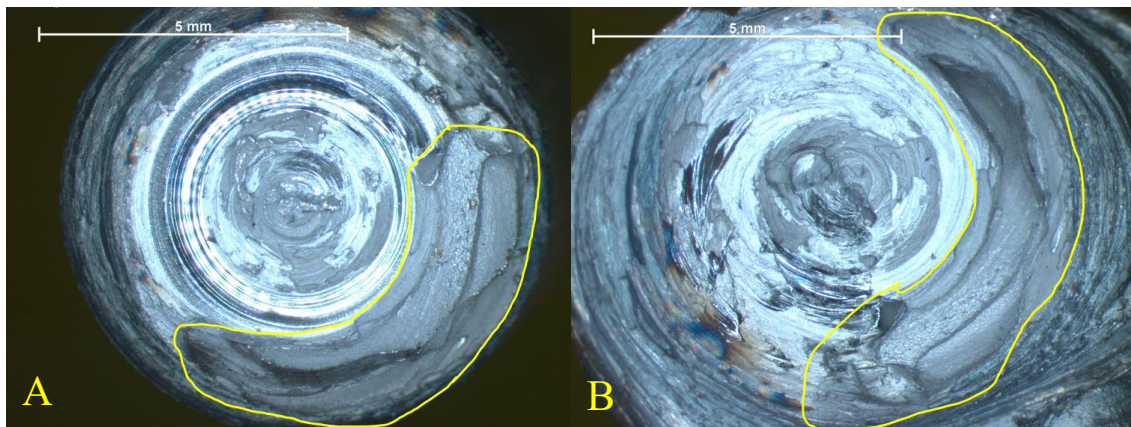
Esse resultado está alinhado com os fundamentos da soldagem por fricção rotativa, nos quais a intensidade da plastificação e a eficiência da difusão na interface são fortemente dependentes da geometria das superfícies em contato, da distribuição térmica e do escoamento do fluxo. A seleção da geometria correta, portanto, é um fator estratégico e crítico para otimizar a resistência mecânica das juntas em materiais dissimilares.

Figura 72 – Pares de solda de ponta cônica convexa de aço SAE 1045 (A) e ponta cônica côncava de aço SAE 1020 (B) para C3



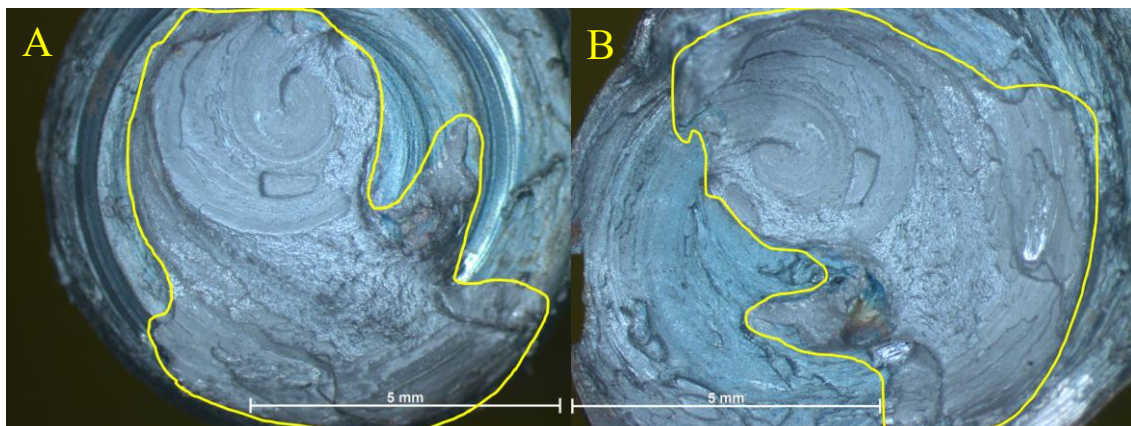
FONTE: Autor (2025).

Figura 73 – Pares de solda de ponta cônica convexa de aço SAE 1045 (A) e ponta cônica côncava de aço SAE 1020 (B) para C4



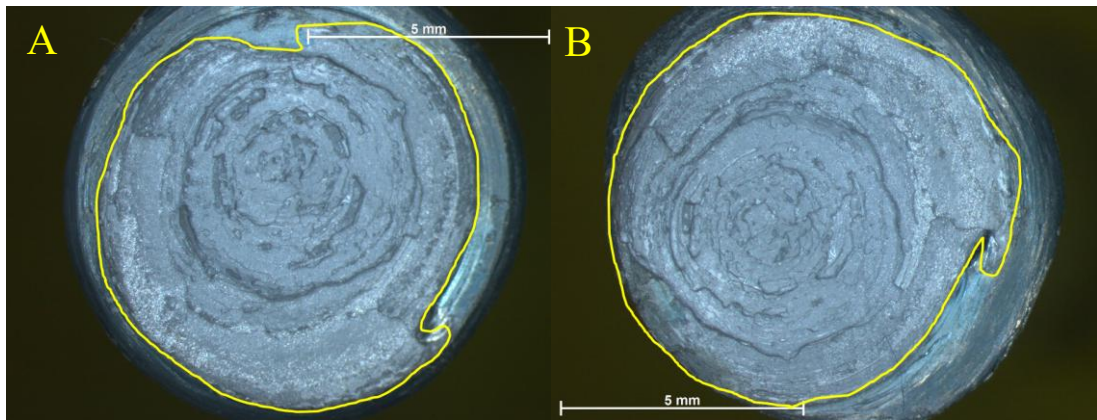
FONTE: Autor (2025).

Figura 74 – Pares de solda de ponta cônica convexa de aço SAE 1045 (A) e ponta cônica côncava de aço SAE 1020 (B) para C5



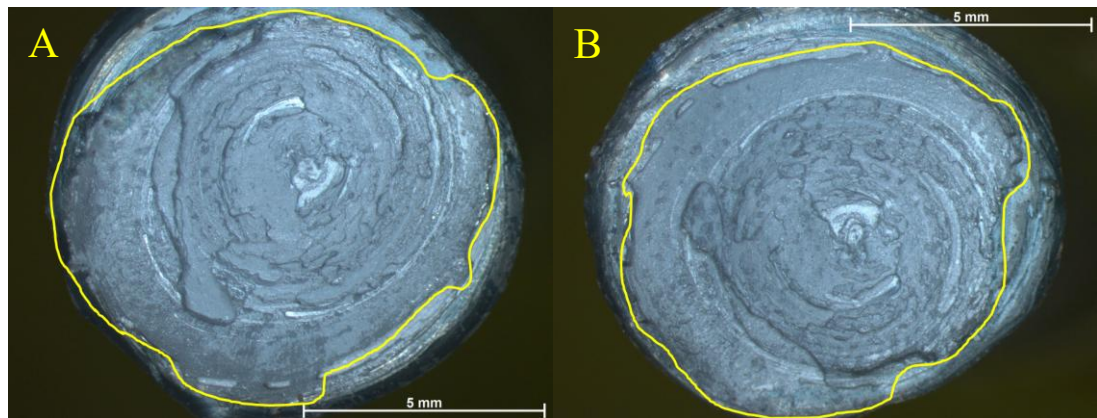
FONTE: Autor (2025).

Figura 75 – Pares de solda de ponta plana de aço SAE 1045 (A) e aço SAE 1020 (B)
para P1



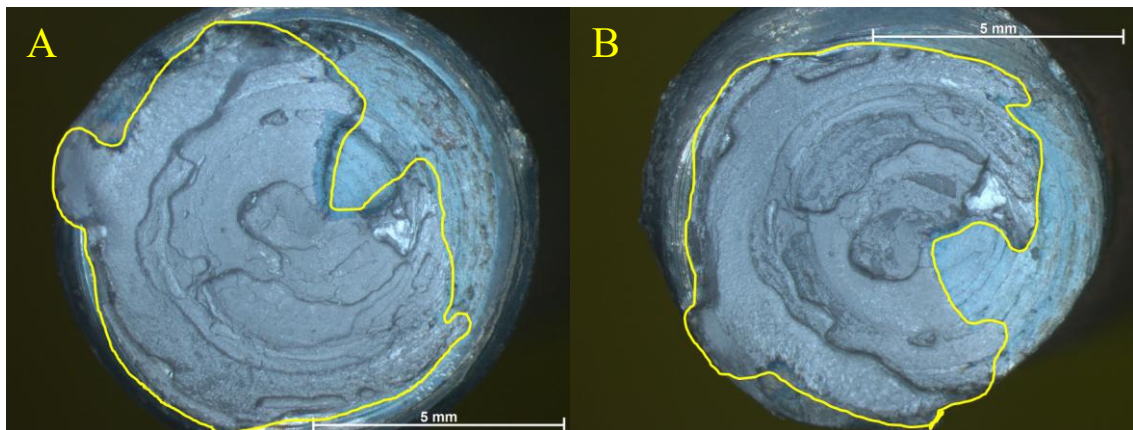
FONTE: Autor (2025).

Figura 76 – Pares de solda de ponta plana de aço SAE 1045 (A) e aço SAE 1020 (B)
para P4



FONTE: Autor (2025).

Figura 77 – Pares de solda de ponta plana de aço SAE 1045 (A) e aço SAE 1020 (B)
para P5



FONTE: Autor (2025).

5 CONCLUSÕES

Este trabalho demonstrou a viabilidade da soldagem por fricção entre os aços SAE 1020 e SAE 1045 utilizando um torno mecânico adaptado, evidenciando que mesmo com recursos experimentais simplificados é possível obter juntas com boa integridade metalúrgica. A soldagem em estado sólido evitou a fusão, reduzindo significativamente a ocorrência de defeitos como trincas e segregações, comuns em processos convencionais.

A geometria das superfícies de contato teve papel determinante no desempenho das juntas. Corpos com pontas planas apresentaram melhor repetibilidade, maior resistência à tração, menor formação de rebarbas e uma interface de ligação mais homogênea. Já os corpos com pontas cônicas exigiram maior tempo de processo, geraram mais deformações e apresentaram menor uniformidade dimensional, indicando menor eficiência térmica e mecânica.

Do ponto de vista microestrutural, observou-se deformação plástica nas regiões próximas à interface, principalmente no aço SAE 1020, mais suscetível ao escoamento devido à sua menor resistência mecânica. A zona termicamente afetada apresentou características compatíveis com aquecimento localizado e resfriamento rápido. O SAE 1045 mostrou maior estabilidade térmica, com alterações microestruturais mais discretas.

Os ensaios de microdureza evidenciaram queda de dureza no SAE 1020, próxima à ZTA, e aumento moderado no SAE 1045, possivelmente causado por encruamento. Os resultados dos ensaios de tração confirmaram a qualidade das juntas, com fraturas na linha de solda e baixa dispersão entre as amostras.

A aplicação de instrumentação simples, como o monitoramento com célula de carga, foi eficaz para controlar o processo e compreender o comportamento das variáveis envolvidas. Assim, o estudo reforça o potencial da soldagem por fricção como uma alternativa viável, segura e eficiente para unir materiais metálicos de diferentes composições e propriedades mecânicas.

Proposta para trabalhos futuros

1. Desenvolver um mecanismo e adaptar uma forma de padronizar a carga de atrito e forjamento através de contrapesos ou sistema hidráulico.
2. Construir um sistema de proteção gasosa para que haja a possibilidade de soldar materiais sensíveis a oxidação como o titânio.
3. Soldar materiais dissimilares como ligas de cobre e alumínio, dentre outros.
4. Adicionar um sistema que meça e capte a temperatura dos corpos de prova para melhor controle do calor gerado pelo atrito.
5. Criar um sistema de indução eletromagnética que aqueça os corpos de prova para estudar como isso afeta a interface de ligação e o tempo de solda.

REFERÊNCIAS

AKINLABI, Esther Titilayo; MAHAMOOD, Rasheedat Modupe. **Solid state welding: friction and friction stir welding processes**. 1ª ed. Cham: Springer International Publishing, 2020.

ASM INTERNATIONAL. ASM Handbook. **Volume 1: Properties and selection: irons, steels and high performance alloys**. 10º ed. Materials Park: ASM International, 1990.

ASM INTERNATIONAL. **Volume 6: Metals handbook: welding, brazing and soldering**. 10º ed. Metals Park, OH: ASM International, 1993.

BHADESHIA, Harshad K. D. H.; HONEYCOMBE, Robert W. K. **Steels: structure, properties and design**. 5º ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2024.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach**. 5º ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.

CHIAVERINI, Vicente. **Tratamento térmico das ligas metálicas**. 2ª ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.

FORTEL. **Microscópio metalográfico platina invertida modelo IM100**. Disponível em: <https://fortel.com.br/produtos/microscopio-metalografico-platina-invertida-modelo-im100/>. Acesso em: 23 maio 2025.

JEFFUS, Larry. **Welding: principles and applications**. 9º ed. Boston: Cengage Learning, 2021.

LI, W. et al. Linear and rotary friction welding review. **International Materials Reviews**, v. 61, n. 2, p. 71-100, 2016.

LIPPOLD, John C.; KOTECKI, Damian J. **Welding metallurgy and weldability of stainless steels**. 2ª ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2005.

MACHADO, Ivan Gilberto. **Soldagem e técnicas conexas: processos**. 1ª ed. Porto Alegre: Ed. do Autor, 1996.

MIR, Fayaz Ahmad; KHAN, Noor Zaman; SIDDIQUEE, Arshad Noor; PARVEZ, Saad. Friction based solid state welding: a review, **ELSEVIER**, v. 62, n. 1, p. 55-62 2022.

MURUGAN, S. Senthil; SATHIYA, P.; HAQ, A. Noorul. Rotary friction welding and dissimilar metal joining of aluminium and stainless steel alloys. **Annals of Dunarea de Jos University of Galati Fascicle XII Welding Equipment and Technology**. v. 32, n. 2, p. 85-92, 2021.

OJETOYE, Abiodun A.; AKANGBE, Samson A.; OLORUNDA, Oludare M. Friction welding processes: a review. **FUOYE Journal of Engineering and Technology**, v. 9, n. 1, p. 103-110, 2024.

PARMAR, Vishalkumar R.; PATEL, Jignesh; SURANI, Piyush. A review paper on

rotary friction welding. **Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)**, v. 9, n. 6, p. 357-365, 2022.

PINHEIRO, M. A. **Influência da forma de contato inicial e preaquecimento na camada intermetálica no processo de soldagem por fricção de materiais dissimilares**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

PORTER, D. A.; EASTERLING, K. E.; SHERIF, M. Y. **Phase transformations in metals and alloys**. 4^a ed. Boca Raton: CRC Press, 2021.

TAVARES, S. S. **Soldagem por fricção convencional entre a liga de alumínio 6351-T6 e o aço SAE 1020 assistida por indução eletromagnética**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio. **Soldagem: processos e metalurgia**. 4^a ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.