

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL

ALBERTO UEMATSU SUZUKI

**CARACTERIZAÇÃO DE VIGAS FORJADAS DE AÇO BAIXO CARBONO
ISENTAS DE TRATAMENTO TÉRMICO FINAL: EFEITOS NA TENACIDADE,
RESISTÊNCIA MECÂNICA E MICROESTRUTURAL**

CAXIAS DO SUL

2024

ALBERTO UEMATSU SUZUKI

**CARACTERIZAÇÃO DE VIGAS FORJADAS DE AÇO BAIXO CARBONO
ISENTAS DE TRATAMENTO TÉRMICO FINAL: EFEITOS NA TENACIDADE,
RESISTÊNCIA MECÂNICA E MICROESTRUTURAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Tecnologia e Engenharia de Materiais para obtenção do grau de
Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Tecnologia e Engenharia de Materiais

Linha de Pesquisa: Conformação de metais

Orientador: Prof. Dr. Juliano Cantarelli Toniolo

CAXIAS DO SUL

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S968c

Suzuki, Alberto Uematsu

Caracterização de vigas forjadas de aço baixo carbono isentas de tratamento térmico final: efeitos na tenacidade, resistência mecânica e microestrutural / Alberto Uematsu Suzuki. – 2024.

ix, 65 f. : il. , color.

Orientador: Juliano Cantarelli Toniolo.

Dissertação (mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Caxias do Sul. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais. Mestrado Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais, Caxias do Sul, BR-RS, 2024.

1. Ciência dos materiais. 2. Aço - Tratamento térmico. 3. Aço - Forjamento. 4. Aço-carbono. 5. Tubos de aço. I. Toniolo, Juliano Cantarelli. II. Título.

CDU 669.13



Dissertação intitulada 'CARACTERIZAÇÃO DE VIGAS FORJADAS DE AÇO BAIXO CARBONO ISENTAS DE TRATAMENTO TÉRMICO FINAL: EFEITOS NA TENACIDADE, RESISTÊNCIA MECÂNICA E MICROESTRUTURAL', de autoria de Alberto Uematsu Suzuki, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

Profa. Dra. Cinthia Gabriely Zimmer
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Pedro Henrique Costa Pereira da Cunha
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Mato Grosso do Sul

Prof. Dr. Wagner Lopes Torquato
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Juliano Cantarelli Toniolo – Orientador
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul

Profa. Dra. Cinthia Gabriely Zimmer
Coordenadora do PPG-TEM

Prof. Dr. Juliano Cantarelli Toniolo
Coordenador Adjunto do PPG-TEM

Data de aprovação: 30 de setembro de 2024

Rua Avelino Antônio de Souza, 1730 | Bairro Nossa Senhora de Fátima | CEP:
95043-700 | Caxias do Sul/RS

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação à minha família pelo apoio incondicional e incentivo ao longo desta jornada, mesmo estando ausente em diversos momentos de estudo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me prover recursos para chegar até aqui.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Juliano Cantarelli Toniolo, por sua orientação, paciência e sabedoria me apoiando ao longo desse estudo. Suas observações, comentários e sugestões fizeram muita diferença no todo.

Agradeço também aos meus colegas de trabalho pela colaboração e pelas discussões calorosas, sempre em prol da otimização de resultados e recursos.

À minha família e amigos que me incentivaram com apoio emocional para a conclusão deste projeto.

Por fim, agradeço às instituições e as empresas que permitiram que esse projeto se tornasse realidade.

“A competitividade de um país não começa nas indústrias ou nos laboratórios de engenharia. Ela começa na sala de aula.” – Lee Iacocca

RESUMO

Para garantir a competitividade de uma viga aplicada em sistemas de suspensão e eixos de reboques e semirreboques é necessário reduzir seus custos de produção, onde um dos mais representativos no processo é o tratamento térmico final. Após a retirada do tratamento térmico final de normalização depois do forjamento, foram retirados corpos de prova para comparação com o material tratado termicamente através do ensaio de tração (resistência à tração, limite de escoamento e alongamento), dureza, microestrutura do aço e tamanho de grão. Todas as características exigidas em projeto foram atendidas, no entanto a resistência ao impacto apresentou-se inferior do esperado. Dessa forma, foi realizado o ensaio de impacto correlacionando a temperatura de forjamento com a sua resistência para atender as premissas das propriedades metalográficas e mecânicas do produto onde a temperatura máxima de forjamento não deve exceder a temperatura padrão de forjamento em 50 °C para evitar a degradação da ponteira forjada.

Palavras-chave: Viga forjada, forjamento à quente, resistência ao impacto, tubo de aço sem costura, aço baixo carbono.

ABSTRACT

In order to maintain the feasibility of axle beam applied in suspension systems and trailer axles, it is necessary to reduce production costs, which one of the most representative is the final heat treatment. After eliminating the final normalization heat treatment following the forging, samples were taken to compare with the heat-treated material through the tensile test (tensile strength, yield strength and elongation), hardness, microstructure and grain size. All the specified characteristics were met; however, the impact resistance was lower than expected. This way, the impact test was done relating the forging temperature with the impact resistance to meet the premises of metallurgic and mechanical properties of the product, thus the maximum forging temperature must not exceed the standard forging temperature in 50 °C to avoid the degradation of the spindle of the beam.

Keywords: Forged beam, hot forging, impact resistance, seamless steel tube, low carbon steel grade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Viga de eixo	02
Figura 2 – Suspensao mecanica para reboques e semirreboques	02
Figura 3 – Fluxo de producao do tubo de aco sem costura.....	03

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparacao das propriedades de cada artigo e referencias da literatura	16
---	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA E PROBLEMA	4
1.2 OBJETIVOS	4
1.2.1 Objetivo geral	4
1.2.2 Objetivos específicos.....	5
2 ARTIGO: CARACTERIZAÇÃO DE VIGA FORJADA SEM TRATAMENTO TÉRMICO FINAL	5
2.1 INTRODUÇÃO.....	8
2.2 MÉTODOS E PROCEDIMENTOS.....	11
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	13
2.4 CONCLUSÃO	20
3 ARTIGO 2: CORRELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA AO IMPACTO E A TEMPERATURA DE FORJAMENTO EM AÇO BAIXO CARBONO	21
3.1 INTRODUÇÃO.....	23
3.2 MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
3.4 CONCLUSÃO	43
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
4.1 INTRODUÇÃO AOS RESULTADOS.....	44
4.2 RESULTADOS SINTETIZADOS DOS ARTIGOS	44
4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS	45
4.4 SUGESTÕES FUTURAS	47
5.4 EXPLICAÇÕES DAS MELHORIAS.....	47

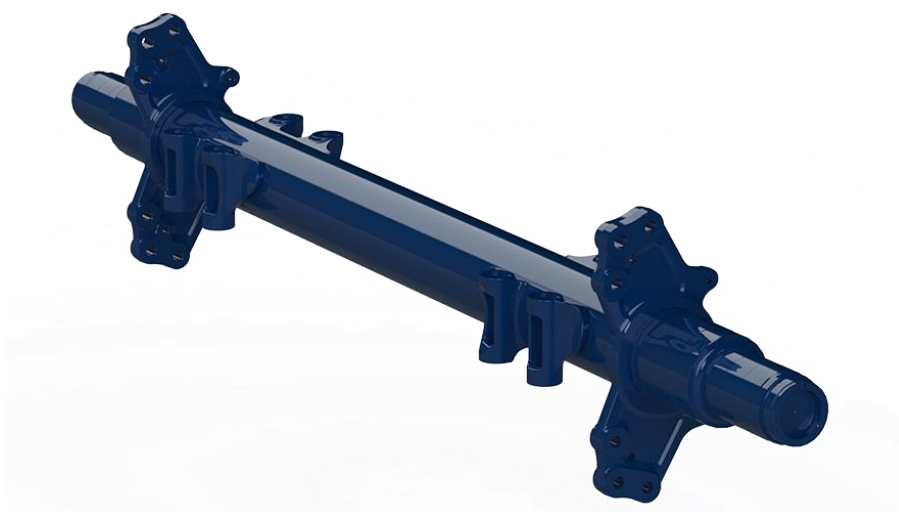
5 CONCLUSÕES	48
REFERÊNCIAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

O cenário atual cada vez mais competitivo com produtores de matéria-prima e processos antes distantes de uma viabilidade logística por estarem localizados geograficamente em locais de difícil acesso, apresentam-se cada vez mais acessíveis. Segundo Ferreira (2019, p. 49), as estratégias de mercado das empresas são impactadas diretamente pela globalização dos bens de produção [1]. Em alguns países onde existe excesso de capacidade produtiva, algumas empresas vendem seus artigos a um preço menor que o seu custo efetivo. Para combater a competitividade desleal, a indústria nacional aplica barreiras protetivas, no entanto o fato é que é necessário a busca pela redução de custo. O trabalho se dá no segmento automotivo onde de acordo com Silva (2021), existe alta competitividade na indústria automotiva instigando o setor a desenvolver e focar em outros meios para obter maiores diferenciais e conseqüente sucesso no mercado [2].

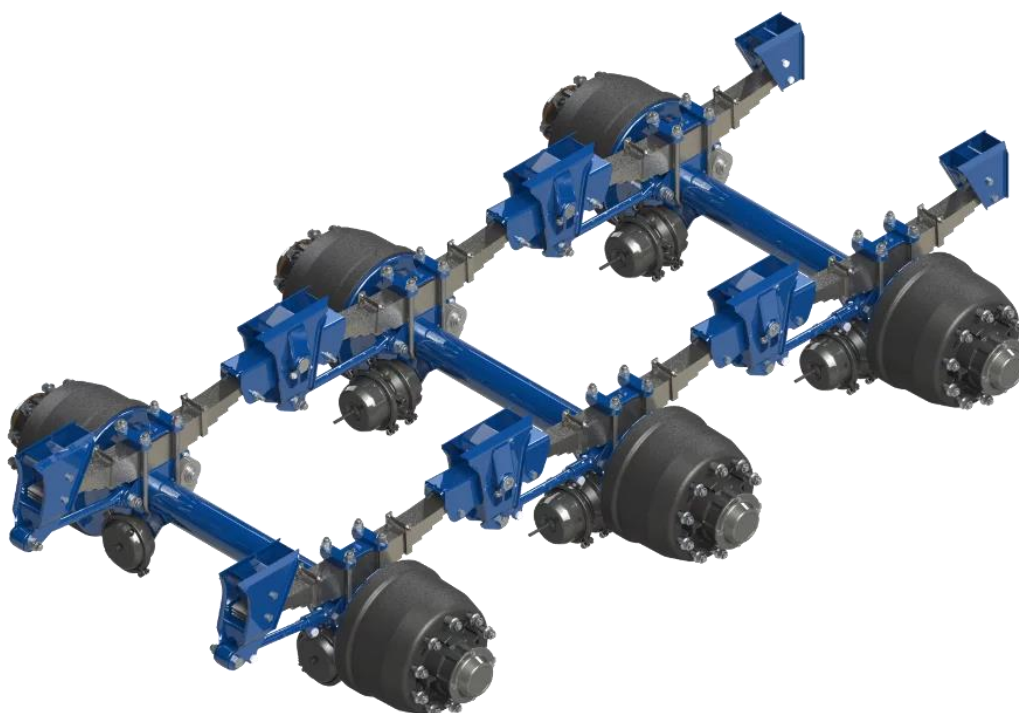
As vigas forjadas (Figura 1) utilizadas no sistema de suspensão de reboques e semirreboques (Figura 2), e terceiro eixo de veículos pesados, são de aço baixo carbono micro ligado ao Nióbio e Vanádio, mais conhecido comercialmente como o aço proprietário FB70 [3]. Elas são produzidas através do forjamento a quente de tubos laminados sem costura através do processo de laminação Mannesmann (Figura 3), através de cilindros cônicos assimétricos geram uma trinca interna na barra sólida, um mandril perfurante propaga essa fissura formando o diâmetro interno do tubo (Silva, 2020) [4]. O tubo sem costura laminado é aquecido a uma temperatura e posteriormente forjado em matriz aberta através de martelotes radiais em todo o perímetro da extremidade do tubo formando a ponteira da viga. O fluxo do processo padrão é a viga após o forjamento a quente ser normalizada em forno de rolos contínuos ou forno rotativo.

Figura 1: Viga de eixo.



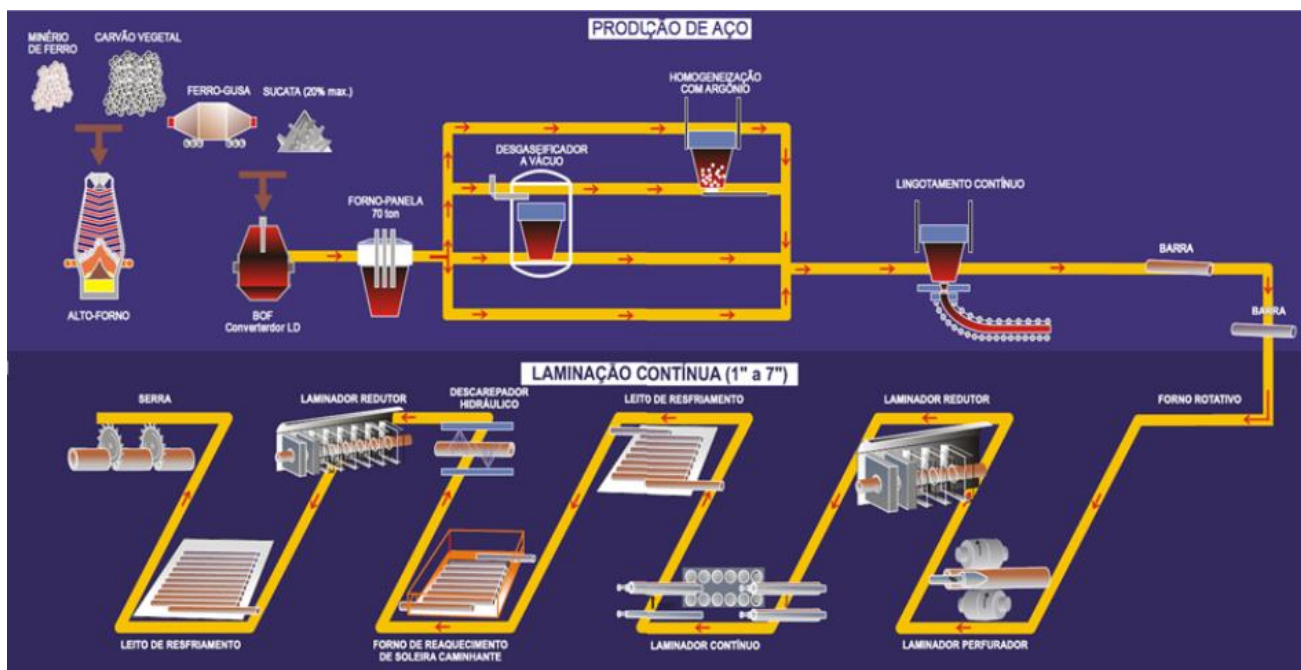
Fonte: Site do fabricante de suspensão KLL.

Figura 2: Suspensão mecânica para reboques e semirreboques.



Fonte: Site do fabricante de suspensão KLL.

Figura 3: Fluxo de produção do tubo de aço sem costura.



Fonte: Catálogo do fabricante de tubo de aço sem costura Vallourec.

Esta dissertação foi estruturada com base na elaboração de dois artigos científicos que refletem as principais etapas do estudo. O primeiro artigo, intitulado "Caracterização de Viga Forjada sem Tratamento Térmico Final", apresenta uma análise detalhada das propriedades mecânicas e metalográficas de vigas forjadas sem o processo de normalização. O segundo artigo, "Correlação entre a Resistência ao Impacto e a Temperatura de Forjamento em Aço Baixo Carbono", explora a relação entre a temperatura de forjamento e a resistência ao impacto das vigas.

A sequência dos artigos foi organizada de forma a primeiro caracterizar as vigas forjadas, estabelecendo uma base sólida sobre suas propriedades, e em seguida, aprofundar-se na análise da resistência ao impacto em função das variáveis do processo de forjamento. Essa estrutura permite uma compreensão progressiva e lógica do impacto do tratamento térmico e das variáveis de forjamento nas propriedades das vigas de aço baixo carbono.

Para o desejado ganho de competitividade, foi realizada caracterização da viga forjada com temperatura 100 °C menor (N -100 °C) que a temperatura padrão de forjamento (N), eliminando o processo de tratamento térmico de normalização final. A

caracterização da viga forjada consistiu na composição química, propriedades mecânicas, dureza, microestrutura e tamanho de grão.

Com o intuito de complementar o estudo, foi realizada a correlação entre a resistência ao impacto e a temperatura de forjamento da viga, para determinar as características de fratura.

1.1 Justificativa e problema

Devido ao cenário de competitividade acirrada entre os atores mundiais no mercado automotivo, combater os fabricantes de vigas forjadas importadas apenas com taxas de importação e cambio volátil sem poder de ação, é muito pouco para uma visão de médio e longo prazo. Faz-se necessário ganhar e manter o diferencial, reduzindo os custos do produto.

Um dos maiores vilões no custo do produto é o tratamento térmico final, e porque é o gargalo da linha. Como os processos são bem controlados, estáveis e não possuem muita variabilidade, optou-se por eliminar o tratamento térmico de normalização final.

Após a retirada do tratamento térmico final, as vigas forjadas apresentaram resistência ao impacto menor mesmo não sendo uma exigência de engenharia do produto. Baseado nesses resultados menores que o esperado, foi realizado o estudo de correlação da resistência ao impacto com a temperatura de forjamento a quente.

1.2 Objetivos

Caracterizar a viga forjada a quente sem tratamento térmico de normalização final e correlacionar a resistência ao impacto com a temperatura de forjamento, visando a redução de custo.

1.2.1 Objetivo geral

Após o processamento da viga forjada a quente sem tratamento térmico final de normalização, verificar se o produto atende às especificações de engenharia referentes às propriedades mecânicas e metalográficas.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Produzir as vigas forjadas sem o tratamento térmico final de normalização.
- Preparar os corpos de prova.
- Realizar os ensaios de tração, dureza superficial, microestrutura, tamanho de grão e impacto.

2 ARTIGO: CARACTERIZAÇÃO DE VIGA FORJADA SEM TRATAMENTO TÉRMICO FINAL

Este artigo foi publicado na Revista Observatorio de La Economía Latinoamericana (ISSN 1696-8352), volume 22, número 1, páginas 2365-2380, em São José dos Pinhais, no dia 22 de janeiro de 2024. O artigo está disponível no seguinte link: DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv22n1-123>.

O periódico é classificado como A4 na área de avaliação de Engenharias II, conforme o sistema Qualis da CAPES para o quadriênio de 2017 a 2020.

CARACTERIZAÇÃO DE VIGA FORJADA SEM TRATAMENTO TÉRMICO FINAL

CHARACTERIZATION OF FORGED AXLE BEAM WITHOUT FINAL HEAT TREATMENT

RESUMO

As vigas forjadas integrais, produzidas de tubo de aço sem costura no Brasil, são comercialmente atrativas devido ao cenário atual do câmbio e ao alto custo de importação das vigas concorrentes. A busca pela competitividade dos produtos nacionais faz-se necessária, a fim de garantir o crescimento e o fortalecimento da indústria de transformação brasileira. Para este trabalho foram caracterizadas vigas forjadas de tubos de aço sem costura no grau de aço FB70 sem o tratamento térmico

de normalização final para simplificar o processo de produção. Para aprovação das vigas sem tratamento térmico final, foram realizados ensaios mecânicos para garantia das especificações de engenharia. Os resultados esperados para as propriedades mecânicas de limite de escoamento mínimo de 490 MPa, resistência à tração mínimo de 610 MPa, alongamento mínimo de 20% e dureza Rockwell B mínima de 87 HRB do tubo forjado sem o tratamento térmico de normalização foram integralmente atendidos baseados na curva de resfriamento típica.

Alberto Uematsu Suzuki ⁽¹⁾
Juliano Cantarelli Toniolo ⁽²⁾

Palavras chaves – Viga forjada, forjamento à quente, tratamento térmico, tubo de aço sem costura, aço FB 70.

ABSTRACT

The monobloc forged tubular beams, manufactured of seamless steel tubes in Brazil, are feasible due to the current Exchange rate and high costs of importation of competitive axle beams. The search for competitiveness of national products is necessary to guarantee the growth and strength of our transformation industry. This work consists of the characterization of forged seamless steel tubes of the steel grade FB70 without the final normalization heat treatment process simplify the manufacturing process. The approval of the axle beams without the heat treatment was done upon laboratory tests for the mechanical properties to guarantee the engineering specifications. The results of the yield strength of 490 MPa, the tensile strength of 610 MPa, elongation of 20% and Rockwell B hardness of 87 HRB were fully attended based on a typical cooling curve.

Key words — Forged beam, hot forging, heat treatment, seamless steel tube, FB70 steel grade.

(1) Mestrando, Instituto Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, albertousuzuki@gmail.com

(2) Prof. Dr. Ing., Instituto Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, juliano.toniolo@caxias.ifrs.edu.br

2.1 INTRODUÇÃO

As vigas forjadas integrais, produzidas de tubo de aço sem costura no Brasil, são comercialmente atrativas devido ao cenário atual do câmbio e ao alto custo de importação das vigas concorrentes. A busca pela competitividade dos produtos nacionais faz-se necessária, a fim de se garantir o crescimento e o fortalecimento da indústria de transformação brasileira. O setor industrial de transformação dos metais conformados movimentará mais de US\$ 69,19 bilhões até o ano de 2022, com uma taxa composta de crescimento de mercado de 25% ao ano (CAGR) [1]. Diferentemente do cenário dos automóveis leves, no qual a tendência é a redução da participação do aço (queda de 16% no período de 2010 –2020, com um aumento no consumo de compósitos plásticos e alumínio) [2], o mercado automotivo pesado continua investindo no uso desse metal devido à altíssima exigência mecânica da maioria de seus componentes.

Apesar de existirem diferentes tecnologias para a produção de vigas aplicadas em eixos automotivos pesados, todas fazem uso de aço carbono. Foram comparados diferentes processos de conformação utilizados na indústria automotiva e reportou que as técnicas mais simples eram as de forjamento com matriz aberta (a matriz é utilizada para deformar o material com uma carga externa) e a de forjamento através de martelo com matriz aberta (uma batida de martelo deforma a superfície do material) [3]. Em 75% de todos os componentes críticos de uma máquina são forjados de aço carbono e ligas de aço [4]. Os processos de obtenção do aço carbono na indústria siderúrgica não diferem muito entre si e, conseqüentemente, os custos produtivos acabam sendo semelhantes. As técnicas de forjamento com matriz aberta e de forjamento com martelo de matriz aberta são as mais utilizadas na produção de eixos [5], principalmente por serem viáveis economicamente na fabricação de altos volumes e por oferecerem ao produto forjado boas propriedades mecânicas, tamanhos e geometrias com alta acurácia dimensional.

O princípio físico do forjamento com matriz aberta envolve o aquecimento da região a ser conformada na zona plástica, com a atuação de manipuladores para controlar a posição da peça na matriz [6]. Os processos de forjamento com matriz

aberta fazem parte de uma longa cadeia de produção, na qual a peça forjada é um produto semiacabado, com suas dimensões finais mais próximas possíveis do produto acabado, a fim de minimizar a usinagem e a sucata gerada no processo matriz [6]. Outro fator que influencia o custo total (15-40%) de forjamento é a ferramenta [7], cujo ciclo de vida deve ser prolongado na produção de vigas forjadas.

Neste caso específico da viga forjada, o processo produtivo com potencial de ganho em competitividade econômica seria o tratamento térmico final de normalização. Este processo é realizado em forno contínuo de rolos ou leitos caminantes na mesma planta onde a peça é forjada, porém em outra usina acabadora, o que acaba gerando alto volume de movimentações internas e custos indiretos. Neste trabalho, será avaliado o efeito da retirada do tratamento térmico de normalização sobre as características de uma viga forjada integral sem costura de aço FB70, com recalque sem ponteiras soldadas, com aplicação no segmento de veículos pesados. Existem diversos processos de fabricação de vigas destinadas às suspensões de reboques, semirreboques e caminhões, assim como diversos graus de aço. Espera-se poder validar a viga forjada integral sem costura de aço FB70, com recalque e sem o tratamento de normalização, de acordo com os requisitos mecânicos e metalúrgicos necessários à aplicação do produto [8].

O método de aquecimento é um fator determinante para a conformação do tubo, cujos parâmetros de eficiência e consumo de energia podem ser simulados por eventos finitos [9]. De acordo com Behrens e colaboradores (2020), os resultados mecânicos e de microestrutura na conformação à quente podem ser otimizados por meio do tratamento das variáveis de processo, tais como temperatura e velocidade de forjamento, velocidade de resfriamento e redução no processo de forjamento [10].

Atualmente, os maiores produtores de implementos rodoviários do mundo são os chineses, assim como de toda a sua cadeia de fornecedores. Para exemplificar, o quantitativo de 135,2 mil eixos e suspensões produzidos em 2020 pelo maior fabricante de implementos rodoviários no Brasil [11] foi produzido em apenas um mês por um concorrente chinês [12]. Este é o tipo de concorrente atual do mercado

nacional automotivo pesado. Quando o valor cambial e o custo de importação estavam economicamente viáveis, os fabricantes chineses de vigas estavam com uma representativa participação no mercado, fazendo com que os fabricantes nacionais perdessem clientes e receita, mesmo oferecendo um valor de venda sem margem. Agora o cenário do câmbio se inverteu, provocando o encarecimento do produto importado, a partir do aumento dos custos de importação. Além de um cenário cambial favorável, várias ações internas foram implementadas para estimular a solução nacional, dentre elas a redução do tempo de produção, o aumento no portfólio das vigas e a localização estratégica de estoques para se reduzir o tempo de transporte dos produtos. O consumo das vigas nacionais no Brasil aumentou, entretanto, a sua dependência em relação ao câmbio e aos custos de importação não torna sustentável o crescimento deste negócio.

Neste contexto, o aproveitamento de uma viga nacional forjada integral sem costura em aço FB70, com recalque e sem tratamento térmico, visa ganhar competitividade com expressiva redução de custos diretos e indiretos. Os processos de forjamento à quente com recalque normalmente requerem homogeneização microestrutural e mecânica. Após a caracterização do produto, será possível avaliar a viabilidade técnica de se poder eliminar a etapa de tratamento térmico da viga, permitindo que esta adquiria competitividade em relação ao fornecedor chinês.

2.2 MÉTODOS E PROCEDIMENTOS

Neste trabalho foram caracterizados os seguintes produtos:

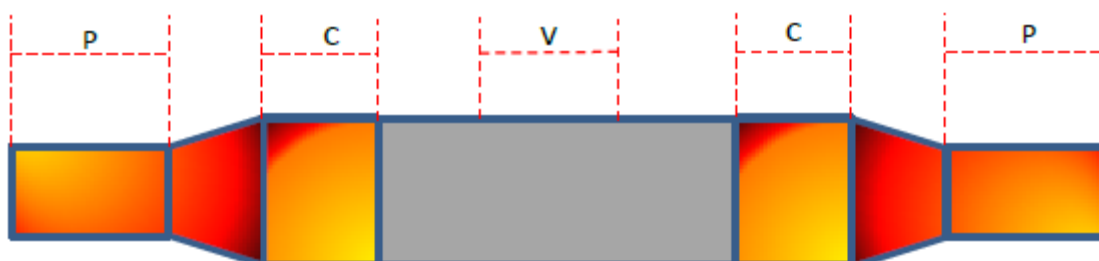
- Vigas forjadas de tubos de aço sem costura no grau de aço FB70 com e sem o tratamento térmico de normalização (a viga com o tratamento térmico foi utilizada como referência).

As etapas de processo de forjamento para o processamento do material são:

- Aquecimento da matéria-prima através de chama direta.
- Forjamento.
- Resfriamento da peça forjada.

Após a conclusão do processo, a viga foi caracterizada em 03 regiões: ponteira (P), corpo (C) e matéria prima (V) onde foram retiradas amostras conforme mostrado no esquema da Figura 1.

Figura 1: Esquema de amostragem.



Fonte: Resultados originais da pesquisa.

Os ensaios realizados nas regiões do esquema de amostragem são:

- Tração com direção do corpo de prova longitudinal, à temperatura ambiente ($L_0=5,65\sqrt{S}$) [13]. O corpo de prova padrão é preparado e colocado numa máquina que o traciona até o seu rompimento, gerando dados de alongamento, limite de escoamento e resistência à tração longitudinal do material previamente dimensionados em projeto pelo fabricante de eixos e suspensões. Conforme disponibilizado no catálogo de produtos forjados da Vallourec, a viga forjada possui um limite de escoamento mínimo de 490 MPa, resistência à tração mínima de 608

MPa e alongamento mínimo de 20% [1]. A aplicação da viga é em eixos e suspensões de implementos rodoviários (carretas e semirreboques) e terceiros eixos de veículos pesados.

- Dureza superficial do material em escala HB [14]. Neste ensaio, a superfície de um corpo de prova é pressionada por uma esfera metálica numa determinada força. Mede-se a profundidade que a esfera metálica adentrou no corpo de prova e obtém-se a dureza do material.

- Microestrutura do aço. É realizada uma análise comparativa visual com aumentos e ataques pré-determinados para a classificação da microestrutura do corpo de prova.

- Tamanho de grão [15]. É preparado o corpo de prova através de amostragem do material a ser ensaiado e realizada uma análise comparativa visual do gabarito padrão, aumentos padrões e ataques padrões à superfície analisada em microscópio.

E ao longo de toda viga forjada é exigido pelo cliente um teste de partícula magnética para garantir que não haja descontinuidades formadoras de regiões concentradoras de tensão, reduzindo drasticamente a vida útil do eixo e/ou da suspensão. A peça é induzida a um campo magnético que detecta qualquer descontinuidade ou defeito no material [16].

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a produção das vigas forjadas sem tratamento térmico foram realizados os ensaios destrutivos para caracterização das propriedades mecânicas do produto.

Para o processo de forjamento utilizou-se uma temperatura menor de aquecimento do tubo em 100 °C em relação à temperatura de forjamento da viga com tratamento térmico. O resfriamento da viga sem tratamento térmico foi realizado ao ar pois o resfriamento forçado não atingiu o alongamento mínimo necessário devido ao tamanho de grão consequente do resfriamento.

3.1 Composição química

A análise química do aço foi obtida através de espectrometria óptica, realizada no laboratório do fabricante conforme tabela 1, através do equipamento Thermo Fischer Scientific ARL iSpark series.

Tabela 1: Composição química da viga.

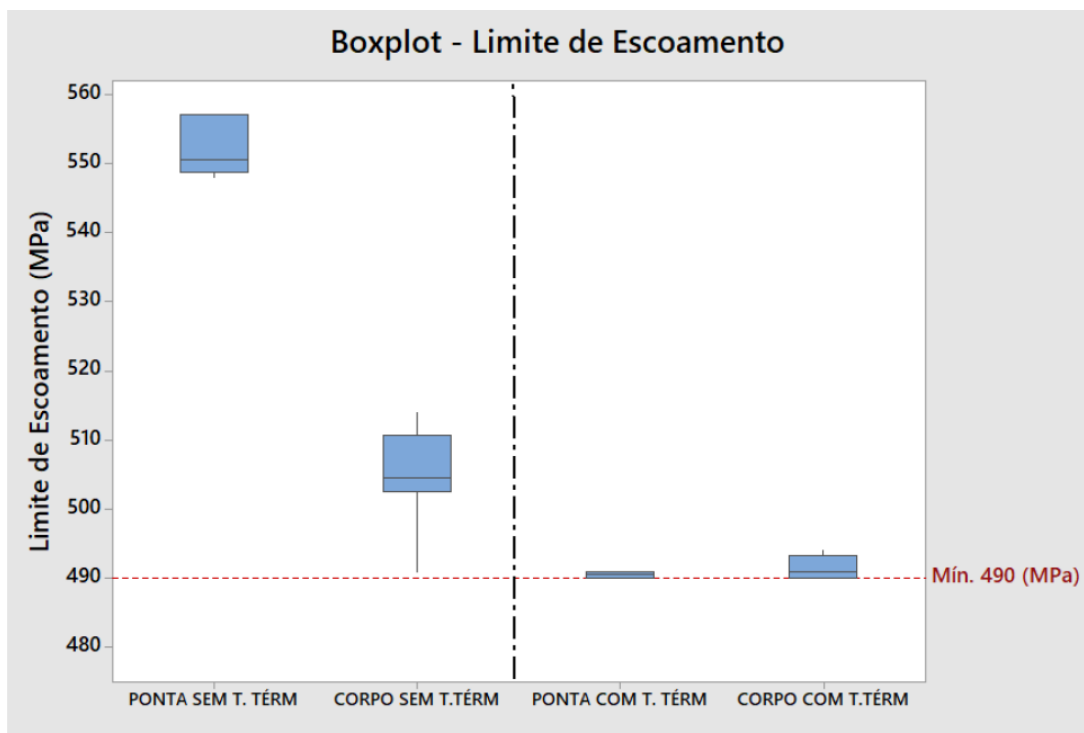
		Composição Química (%p/p)													
Corrida		C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	V	Nb	Ti	N
145595		0,190	1,690	0,014	0,001	0,420	0,010	0,200	0,010	0,035	0,010	0,153	0,001	0,002	0,0210
182844		0,200	1,710	0,011	0,001	0,420	0,020	0,200	0,020	0,031	0,020	0,150	0,001	0,003	0,0186
Especificação	Mín.	-	1,400	0,000	0,000	0,200	0,000	0,000	0,000	0,020	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0065
	Máx.	0,220	1,800	0,050	0,050	0,500	-	-	-	-	-	0,180	-	-	-

Fonte: Resultados originais da pesquisa.

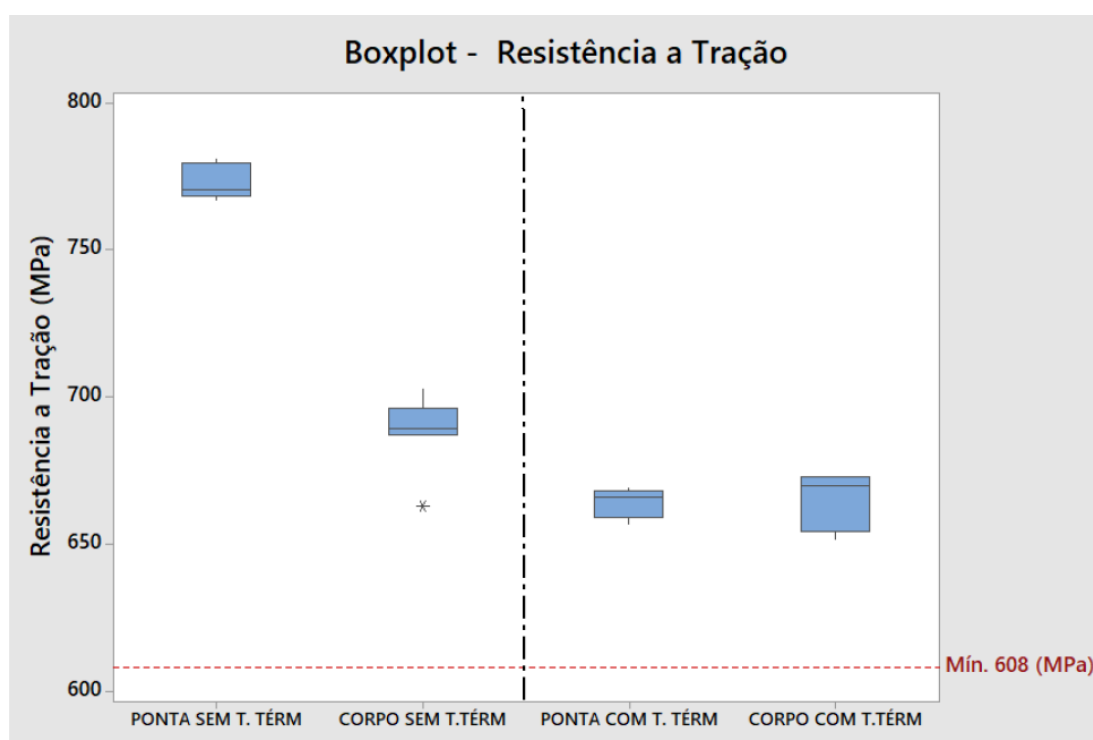
A composição química das corridas 145595 e 182844 atendem o especificado pelo fabricante das vigas forjadas.

3.2 Ensaio de tração

Nas figuras 2, 3 e 4 são apresentados gráficos de comparação dos resultados obtidos no ensaio de tração longitudinal para cada região das vigas sem tratamento térmico e vigas com tratamento térmico assim como o mínimo especificado em catálogo para o produto. Foram retirados 8 corpos de prova para a viga com tratamento térmico e 12 corpos de prova para a viga sem tratamento térmico. A máquina de tração utilizada para realizar o ensaio de tração foi o EMIC DL-100000.

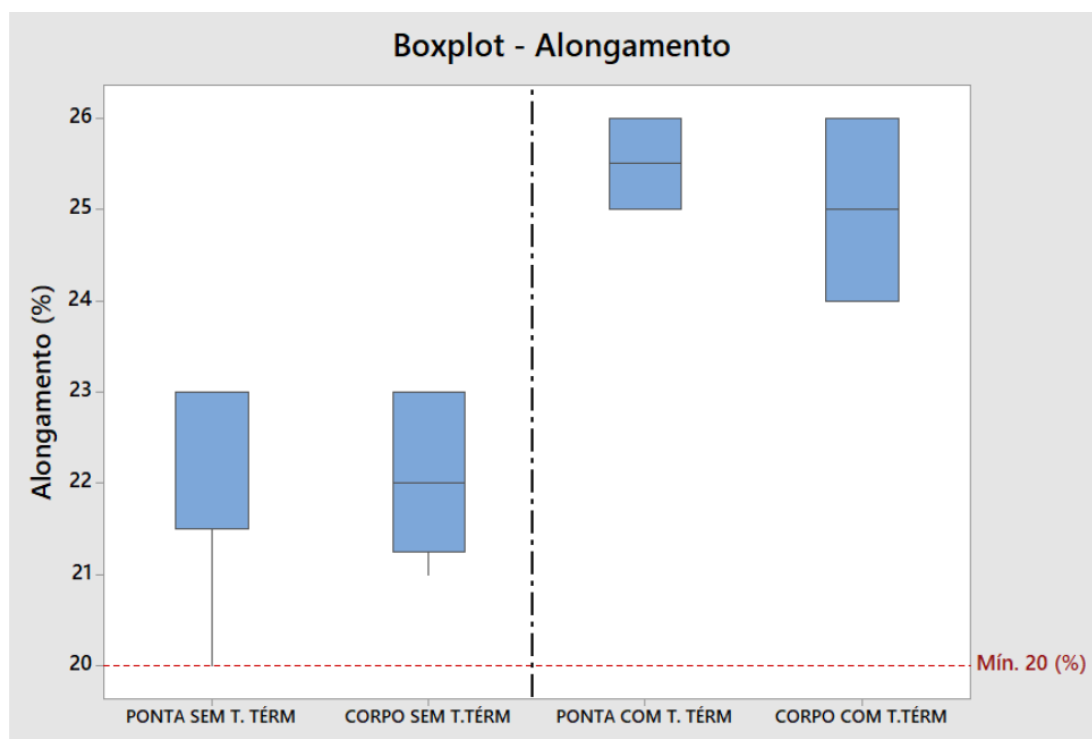
Figura 2: Gráfico dos resultados de limite de escoamento.

Fonte: Resultados originais da pesquisa.

Figura 3: Gráfico dos resultados de resistência à tração.

Fonte: Resultados originais da pesquisa.

Figura 4: Gráfico dos resultados de alongamento.



Fonte: Resultados originais da pesquisa.

Todos os resultados se apresentaram dentro do especificado. Os resultados de propriedades mecânicas das vigas sem tratamento térmico se apresentaram superiores aos da viga normalizada com exceção do alongamento que é inversamente proporcional ao limite de escoamento e resistência à tração. As ponteiros forjadas à quente apresentaram maiores propriedades mecânicas devido influência da conformação à quente. Para as vigas normalizadas, os resultados não apresentaram diferenças significativas de propriedades mecânicas entre o corpo e ponteira devido influência do tratamento ao longo do corpo da viga como um todo homogeneizando o produto.

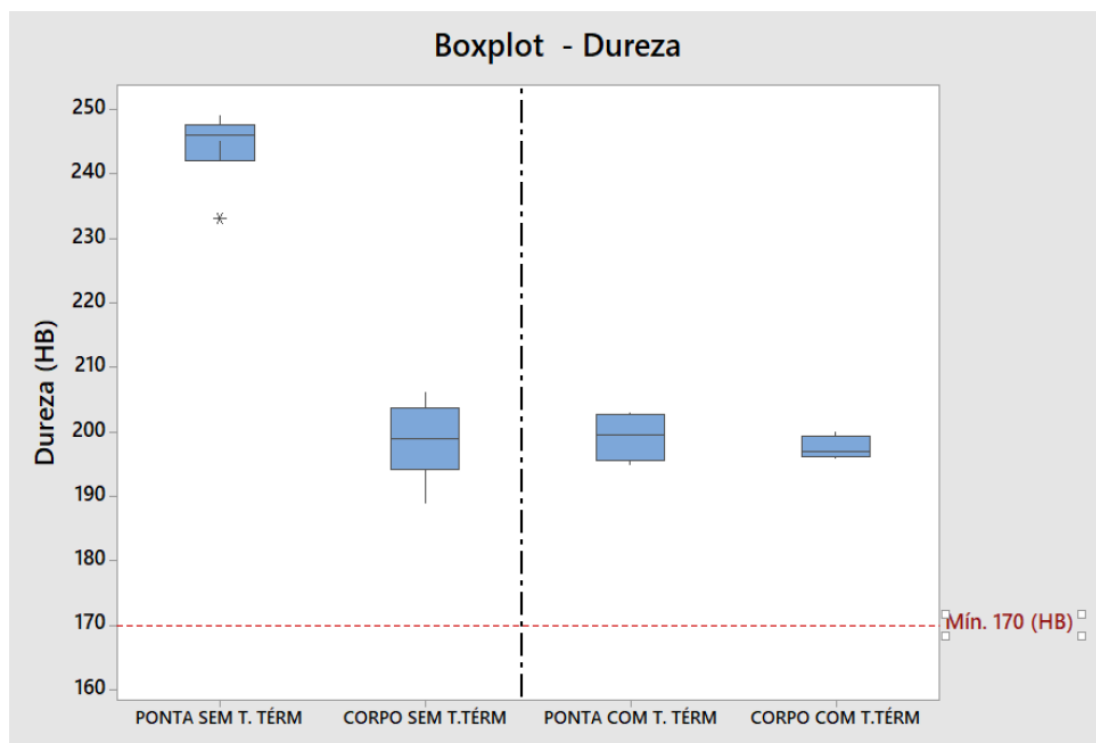
3.3 Ensaio de dureza

O ensaio de dureza foi realizado na seção transversal das amostras em escala HB. Foram retirados 8 corpos de prova para a viga com tratamento térmico e 12 corpos de prova para a viga sem tratamento térmico. Na figura 5 é apresentado o gráfico de comparação dos resultados obtidos no ensaio de dureza para cada condição proposta pela experiência, assim como o mínimo especificado em catálogo pelo fabricante. O equipamento utilizado foi o Emcotest Duravision 250 G5.

Todos os resultados se apresentaram dentro do especificado e seguiram o mesmo

comportamento do limite de escoamento e resistência à tração pois são diretamente proporcionais. A dureza da ponteira ficou superior que o corpo devido influência da conformação à quente, forjamento através de martelos com matriz aberta.

Figura 5: Gráfico dos resultados de dureza HB.



Fonte: Resultados originais da pesquisa.

3.4 Ensaio de microestrutura e tamanho de grão

Os ensaios de microestrutura (tabelas 2 e 3, e figuras 6 e 7) e tamanho de grão (tabelas 4 e 5) foram realizados para comparar as propriedades metalográficas das vigas utilizadas com e sem normalização. Foram retiradas amostras da ponta e área de transição nas condições com e sem tratamento térmico. Para a caracterização da viga com tratamento térmico, 8 corpos de prova; e para a viga sem tratamento térmico um total de 12 corpos de prova. O microscópio utilizado para analisar as amostras foi o Leica DM 4000 M.

Tabela 2: Resultados de microestrutura para o material com tratamento

Microestrutura Longitudinal – Normalizado			
Região	Am	Lado	Resultado
Ponta	1	1	Ferrita, perlita e 5% de bainita
Ponta	1	2	Ferrita, perlita e 7% de bainita
Ponta	2	1	Ferrita, perlita e 9% de bainita
Ponta	2	2	Ferrita, perlita e bainita
Corpo	1	1	Ferrita, perlita e 9% de bainita
Corpo	1	2	Ferrita, perlita e 9% de bainita
Corpo	2	1	Ferrita, perlita e 5% de bainita
Corpo	2	2	Ferrita, perlita e 9% de bainita
térmico.	Especificação		Informativo

Fonte: Resultados originais da pesquisa.

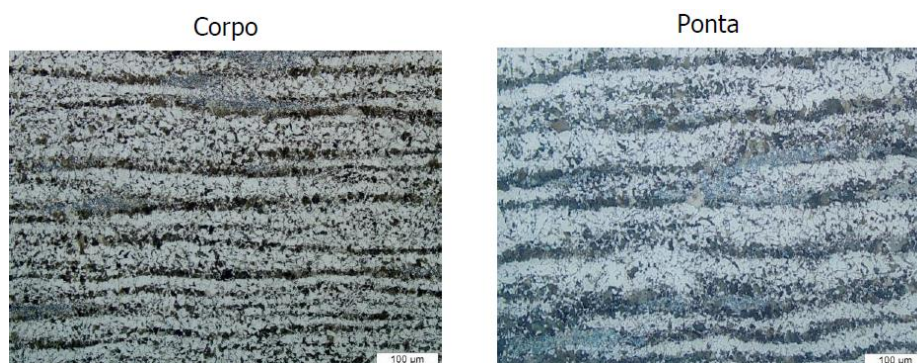
Tabela 3: Resultados de microestrutura para o material sem tratamento térmico.

Microestrutura Longitudinal - Não normalizado			
Região	Am	Lado	Resultado
Ponta	1	1	Ferrita, perlita e 5% de bainita
Ponta	1	2	Ferrita, perlita e bainita
Ponta	2	1	Ferrita, perlita e 5% de bainita
Ponta	2	2	Ferrita, perlita e 7% de bainita
Ponta	3	1	Ferrita, perlita e 3% de bainita
Ponta	3	2	Ferrita, perlita e 5% de bainita
Corpo	1	1	Ferrita e perlita
Corpo	1	2	Ferrita, perlita e 8% de bainita
Corpo	2	1	Ferrita, perlita e 8% de bainita
Corpo	2	2	Ferrita, perlita e 5% de bainita
Corpo	3	1	Ferrita, perlita e 7% de bainita
Corpo	3	2	Ferrita, perlita e 5% de bainita
Especificação		Informativo	

Fonte: Resultados originais da pesquisa.

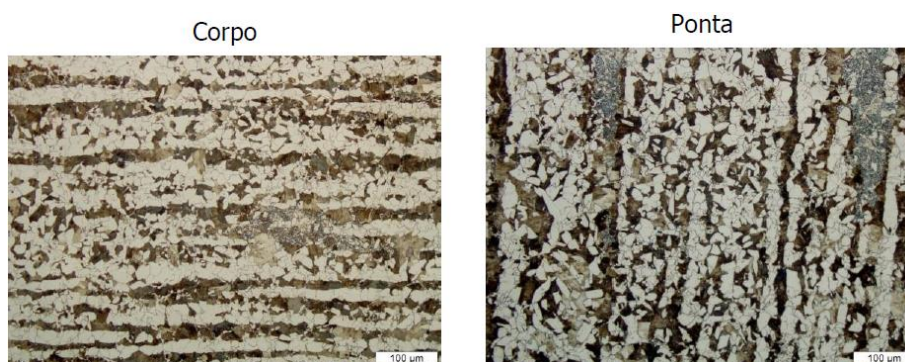
As figuras 6 e 7 apresentam a microestrutura das vigas com e sem tratamento térmico respectivamente.

Figura 6: Microestrutura da região do corpo e ponta da viga com tratamento térmico – 200x.



Fonte: Resultados originais da pesquisa.

Figura 7: Microestrutura da região do corpo e ponta da viga sem tratamento térmico – 200x.



Fonte: Resultados originais da pesquisa.

Tabela 4: Resultados de tamanho de grão para o material com tratamento térmico.

Tamanho de grão - Normalizado			
Região	Am	Lado	Resultado
Ponta	1	1	8,5/9,5
Ponta	1	2	8/9
Ponta	2	1	8/9
Ponta	2	2	8/9
Corpo	1	1	8,5
Corpo	1	2	8/9
Corpo	2	1	9/10
Corpo	2	2	8/9
Tolerância		Informativo	

Fonte: Resultados originais da pesquisa.

Tabela 5: Resultados de tamanho de grão para o material sem tratamento

Tamanho de grão - Não normalizado			
Região	Am	Lado	Resultado
Ponta	1	1	7/9
Ponta	1	2	7/9
Ponta	2	1	7/9
Ponta	2	2	6,5/7
Ponta	3	1	7/9
Ponta	3	2	7/7,5
Corpo	1	1	7/7,5
Corpo	1	2	9,5
Corpo	2	1	8/9
Corpo	2	2	7/7,5
Corpo	3	1	6/8
Corpo	3	2	8/9
		Tolerância	Informativo

térmico.

Fonte: Resultados originais da pesquisa.

Foi possível observar uma variação presente de bainita entre 3 e 9% em uma matriz de perlita e ferrita. Este fato ocorreu em todas as condições, inclusive nas vigas com tratamento térmico de normalização.

Foi possível observar também que os tamanhos de grão foram semelhantes variando no corpo de 6 a 10 e na ponta de 6,5 a 9,5.

2.4 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram realizadas caracterizações das propriedades mecânicas e metalográficas da viga forjada à quente obtida a partir de tubo de aço sem costura no aço FB70 sem a realização do tratamento térmico final de normalização.

Verificou-se que os resultados das análises de composição química, dos ensaios mecânicos (tração e dureza), das análises metalográficas (microestrutura e tamanho de grão) obtidos nos produtos forjados sem o tratamento térmico encontram-se dentro do especificado tecnicamente [1] pois o tratamento térmico de normalização visa homogeneizar a superfície ao longo de toda a superfície da viga forjada [17] no entanto com o resfriamento ao ar após o forjamento à quente as propriedades mecânicas se apresentaram conforme projeto. A microestrutura obtida foi similar mesmo sem a normalização porque o forjamento à quente com a temperatura de trabalho acima da temperatura de recristalização com resfriamento ao tempo simulou uma normalização nas vigas forjadas.

REFERÊNCIAS

- [1] KANG, Hyoung Seok; LEE, Ju Yeon; CHOI, SangSu; KIM, Hyun; PARK, Jun Hee; SON, Ji Yeon; KIM, Bo Hyun; NOH, Sang Do. Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, V. 3, 2016, p. 111–128.
- [2] FERREIRA, César Augusto. Encontro de Fornecedores Randon 2021, 2021, Caxias do Sul, RS: CTR, 2021.
- [3] HORTON, Philippa M.; ALLWOOD, Julian M. Yield improvement opportunities for manufacturing automotive sheet metal components. *Journal of Materials Processing Technology*, V. 249, 2017, p. 78-88.
- [4] RAO, V Divakar. Metallurgical integrity for economic production of quality steel forgings for advanced applications. *Materials Today: Proceedings*, V. 39, 2021, p. 1434–1439.
- [5] AWASTHI, Ankita; SAXENA, Kuldeep K.; ARUN, Vanya. Sustainable and smart metal forming manufacturing process. *Materials Today: Proceedings*, V. 44, 2021, p. 2069–2079.
- [6] WOLFGARTEN, Martin; HIRT, Gerhard. New method for the manufacturing of curved workpieces by open die forging. *CIRP Annals*, V. 65, I. 1, 2016, p. 285–288.
- [7] WIDOMSKI, Pawel; GRONOSTAJSKI, Zbigniew. Comprehensive Review of Methods for Increasing the Durability of Hot Forging Tools. *Procedia Manufacturing*, V. 47, 2020, p. 349–355.
- [8] VALLOUREC Soluções Tubulares do Brasil S.A. Catálogo de Tubos Forjados. Belo Horizonte: 2015.
- [9] XU, Chung; REN, Guangsheng; GUO, Yongqiang; REN, Weiwei; ZHANG, Ya. Tube necking extrusion principle and forming process of trailer rear axle. *Procedia Engineering*, V. 81, 2014, p. 634-640.
- [10] BEHRENS, Bernd-Arno; BRUNOTTE, Kai; WESTER, Hendrik; KOCK, Christoph. Experimental investigations on the interactions between the process parameters of hot forming and the resulting residual stresses in the component. *Procedia Manufacturing*, V. 50, 2020, p. 706–712.
- [11] EMPRESAS RANDON. Relatório Anual da Administração 2020.
- [12] FUWA, 2021. Site da empresa. Disponível em: http://www.fuwa.cn/jtj/index_71.aspx. Acesso em: 05 nov. 2021.

- [13] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products: referências: A370-20. West Conshohocken: ASTM, 2020.
- [14] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard test methods for Rockwell hardness of metallic materials: referências: E18-20. West Conshohocken: ASTM, 2020.
- [15] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard test methods for determining average grain size: referências: E112-13. West Conshohocken: ASTM, 2013.
- [16] ANDREUCCI, Ricardo. Apostila de partícula magnética. Associação brasileira de ensaios não destrutivos. São Paulo, jan. 2020.
- [17] CALLISTER, W.D., Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução, Editora LTC, 10ª ed., 2020.

3 ARTIGO 2: CORRELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA AO IMPACTO E A TEMPERATURA DE FORJAMENTO EM AÇO BAIXO CARBONO

O artigo foi publicado na Revista Observatorio de La Economia Latinoamericana, ISSN 1696-8352 no v. 22, n. 4, p. 01-18 em São Jose dos Pinhais em 26 de abril de 2024. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv22n4-200>

O periódico para a área de avaliação Engenharias II foi classificado como A4 para o quadriênio de 2017 a 2020.

CORRELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA AO IMPACTO E A TEMPERATURA DE FORJAMENTO EM AÇO BAIXO CARBONO

CORRELATION BETWEEN IMPACT RESISTANCE AND THE FORGING TEMPERATURE OF A LOW CARBON STEEL

RESUMO

Para a redução do custo de produção de uma viga aplicada em suspensões e eixos de veículos pesados e semipesados foi retirado o tratamento térmico final. O aço de baixo carbono e baixa liga forjado a quente sem normalização final possui em geral propriedades mecânicas que atendem as exigências do setor automotivo quando aplicado nos eixos auxiliares e suspensões de veículos e implementos rodoviários. No entanto, a característica de resistência ao impacto apresentou-se abaixo do esperado. Para este estudo, foram caracterizadas amostras em diferentes temperaturas de forjamento para correlacionar a resistência ao impacto com a temperatura de forjamento. O melhor resultado apresentado foi com

a temperatura de forjamento de 50 °C acima da temperatura nominal de forjamento com limite de escoamento de 539 Mpa, resistência a tração de 746 Mpa, alongamento de 21%, resistência ao impacto médio de 76 J e tamanho de grão 8.

Alberto Uematsu Suzuki ⁽¹⁾
Juliano Cantarelli Toniolo ⁽²⁾

Palavras chaves – Viga forjada, forjamento à quente, resistência ao impacto, tubo de aço sem costura, aço baixo carbono.

ABSTRACT

In order to reduce the production costs of an axle beam applied to suspensions and axles of heavy vehicles the final heat treatment was laid off. The low carbon and low alloy steel hot forged without final normalization has in general mechanical properties that attend the need of the automotive sector when applied to auxiliary axles and suspensions of vehicles and trailers. Nevertheless, the absorbed impact results were below the expectations. For this study, samples were characterized in different forging temperatures to correlate the impact resistance with the forging temperature. The best result was forging with 50 °C above the nominal temperature resulting in a 539 MPa yield strength, 746 MPa of tensile strength, 21% of elongation, 76 J of the mean average impact resistance, and a size grain 8.

Key words — Forged beam, hot forging, impact resistance, seamless steel tube, low carbon steel grade.

⁽¹⁾ Mestrando, Instituto Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, albertousuzuki@gmail.com

⁽²⁾ Prof. Dr. Ing., Instituto Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, juliano.toniolo@caxias.ifrs.edu.br

3.1 INTRODUÇÃO

Em estudo inicial de redução de custo no processo de produção de vigas forjadas a quente, foi proposta a retirada do tratamento térmico de normalização em forno contínuo de rolos. Os resultados de propriedades mecânicas ficaram dentro do especificado pelo projeto de engenharia: limite de escoamento, resistência a tração, alongamento e dureza. A composição química também ficou dentro do especificado para o aço de baixo carbono (aço proprietário FB70) [1]. Os resultados metalográficos ficaram dentro do esperado, porém sem exigência e não especificado pela engenharia do cliente. Uma análise complementar foi realizada levando-se em consideração a energia de impacto absorvida pela viga forjada e os resultados foram baixos mesmo não sendo uma exigência do cliente.

Anteriormente a melhoria de processo visando a redução de custo com a retirada do tratamento térmico, havia após o processo de forjamento a quente o tratamento térmico de normalização das vigas. Esse tratamento térmico era realizado em fornos contínuos de rolos a temperatura de 920 °C. A resistência ao impacto aumenta significativamente após a normalização realizada entre 840 e 950 °C com resfriamento ao ar do aço de baixo carbono micro ligado ao Nióbio e Vanádio [2].

A aplicação da viga forjada a quente no Brasil é na suspensão e eixo de reboques e semirreboques da indústria automotiva pesada. Em alguns casos também é aplicada como o terceiro eixo em caminhões. Quando instalados em caminhões, os eixos auxiliares não são trativos e por exigência das montadoras, os sistemistas realizam o tratamento térmico de tempera e revenimento (após processarem a viga e montarem os conjuntos e subconjuntos do produto final), para aumentar as propriedades mecânicas. Quando os veículos são exportados, uma prática comum no conjunto completo é submetê-los ao ensaio de impacto a temperaturas abaixo de 0 °C para garantir que a viga possa ser aplicada em temperaturas baixas [3].

Existem diferentes processos de produção das vigas aplicadas em suspensões automotivas pesadas. Quando comparados os diferentes processos

de conformação utilizados na indústria automotiva, as técnicas mais simples eram as de forjamento com matriz aberta (a matriz é utilizada para deformar o material com uma carga externa) e a de forjamento através de martelo com matriz aberta (uma batida de martelo deforma a superfície do material) [4].

A técnica de forjamento através de matriz aberta envolve o aquecimento da região a ser conformada na zona plástica, com a atuação de manipuladores para controlar a posição da região a ser deformada pela ferramenta chamada matriz [5].

O processo de aquecimento é um fator determinante para a conformação do tubo, onde os parâmetros de eficiência e consumo de energia podem ser simulados por eventos finitos [9]. De acordo com Behrens e colaboradores (2020), os resultados mecânicos e de microestrutura na conformação à quente podem ser otimizados por meio do tratamento das variáveis de processo, tais como temperatura e velocidade de forjamento, velocidade de resfriamento e redução no processo de forjamento. Além disso, durante a fase de transformação do processo de difusão com temperatura controlada, as tensões residuais são praticamente nulas quando resfriados ao ar [6].

Neste contexto, este estudo visa investigar a correlação entre a resistência ao impacto e a temperatura de forjamento de uma viga nacional forjada integral sem costura em aço de baixo carbono (aço proprietário FB70), com recalque e sem tratamento térmico final. A pesquisa tem como objetivo determinar como diferentes temperaturas afetam a resistência ao impacto.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

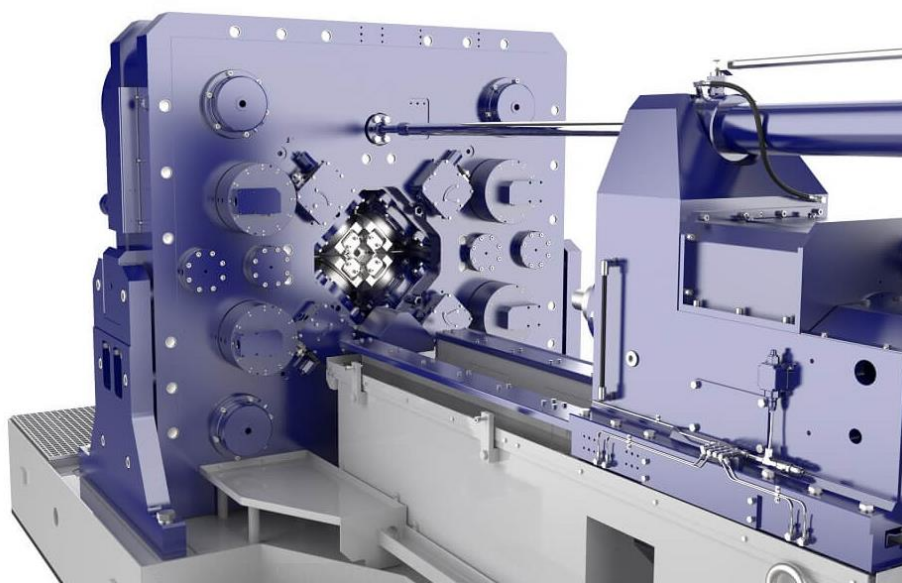
Para este projeto de pesquisa foram caracterizadas vigas produzidas através do forjamento a quente em diferentes temperaturas de tubo de aço sem costura no grau de aço FB70.

O fluxo do processo de produção do material é descrito abaixo:

- Aquecimento da matéria-prima através de forno com chama direta. Neste processo a chama de gás natural aquece diretamente a superfície do tubo. O material é retirado do forno através de uma pinça após atingir a temperatura desejada.

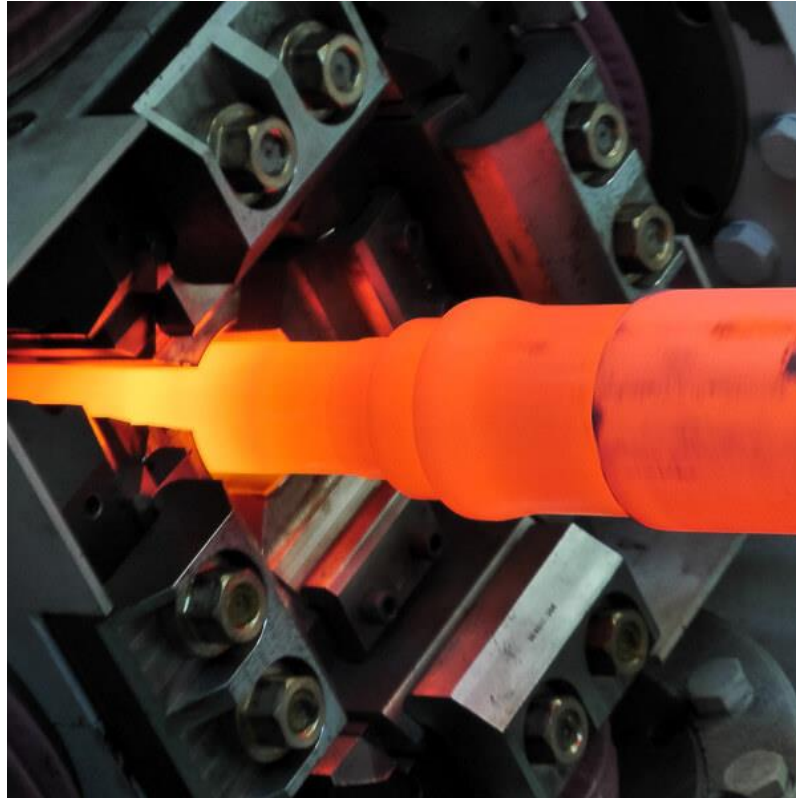
- Forjamento radial através de marteletes com matriz aberta demonstrado na Figura 1. Os marteletes facetam a superfície externa (Figura 2) com uma frequência pré-determinada em um movimento radial em relação ao centro do tubo com um deslocamento longitudinal através de um manipulador. A peça gira em torno do seu eixo enquanto os marteletes ficam em posição fixa.

Figura 1: Máquina de forjamento radial do fabricante GFM.



Fonte: Site do fabricante GFM.

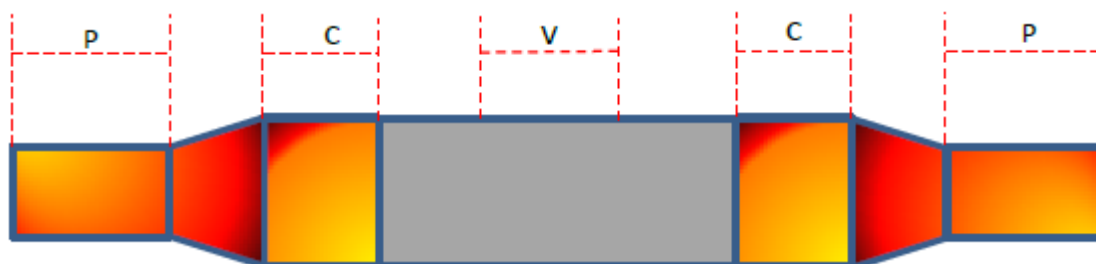
Figura 2: Forjamento radial a quente.



Fonte: Site do fabricante da máquina de forjamento GFM.

- Resfriamento da peça forjada. A peça é retirada da forja e resfriada ao ar não forçado em leito de resfriamento dedicado.

Após a conclusão do processo, a viga foi caracterizada na região crítica da ponteira descrita como região P conforme mostrado no esquema da Figura 3. A região é considerada crítica devido a maior deformação mecânica realizada pelos marteletes de forjamento e devido a exposição da viga a chama direta para o aquecimento antes do forjamento. Na região "V" não existe conformação e nem exposição ao calor da chama para a deformação mecânica. Na região "C" existe transferência de calor da região "P", porém com pouca relevância quando comparado a região de aquecimento direto pois também não possui contato com os marteletes.

Figura 3: Esquema de amostragem.

Fonte: Resultados originais da pesquisa.

Para o processo de forjamento foram utilizadas as temperaturas: nominal (N) de forjamento a quente, nominal de forjamento menos 75 °C (N - 75 °C), nominal de forjamento mais 50 °C (N + 50 °C) e nominal de forjamento mais 100 °C (N + 100 °C). Um aspecto importante durante o processo de conformação no forjamento a quente, é a recristalização dinâmica do aço que define a microestrutura inicial do produto para os subseqüentes passos no processamento do material [7].

O resfriamento da peça após o forjamento a quente foi realizado ao ar. O fabricante em trabalhos anteriores, realizou o resfriamento forçado ao ar através de ventiladores com o intuito de reduzir o tempo de resfriamento para obter propriedades mecânicas maiores como consequência da formação da martensita. No entanto não foi possível obter uma taxa de resfriamento rápida o suficiente e as propriedades mecânicas obtidas através do resfriamento forçado não foram representativamente maiores do que o resfriamento não forçado. Desta forma, optou-se pelo resfriamento ao ar não forçado após o forjamento a quente.

Os ensaios realizados na região "P" foram: ensaio de tração, ensaio de impacto Charpy, análise metalográfica, tamanho de grão e análise química.

2.1. Ensaio de tração

A resistência a tração é uma medida para avaliar as propriedades mecânicas de um material, produto ou componente. Ela é definida como a tensão máxima que uma amostra pode suportar antes da falha.

O ensaio de tração com direção do corpo de prova longitudinal foi realizado à temperatura ambiente [8]. O corpo de prova padrão é preparado e colocado numa máquina que o traciona até o seu rompimento, gerando dados de alongamento, limite de escoamento e resistência à tração longitudinal do material previamente dimensionados em projeto pelo fabricante de eixos e suspensões. Conforme disponibilizado no catálogo de produtos forjados do fabricante de vigas forjadas Vallourec, a viga forjada possui um limite de escoamento mínimo de 490 MPa, resistência à tração mínima de 608 MPa e alongamento mínimo de 20% [9].

Para o ensaio de tração foram retirados 4 corpos de prova, isto é, 1 amostra para cada temperatura de forjamento. A máquina de tração utilizada para realizar o ensaio de tração foi a EMIC DL-100000 que possui capacidade máxima de tração de 100 kN.

2.2. Ensaio de impacto Charpy

Com o intuito de se determinar as características de fratura através de altas taxas de carregamento foi desenvolvida a técnica de ensaio por impacto. Os metais normalmente são dúcteis e fraturam de forma abrupta com diminuta deformação plástica quando submetidos a altas taxas de carregamento em algumas circunstâncias [10]. Essas circunstâncias escolhidas para a fratura ocorrer são a deformação a uma temperatura relativamente baixa, taxa de deformação alta, e estado de tensão triaxial através de entalhe.

A técnica para o ensaio de impacto Charpy é a mais comum utilizada pelo fabricante das vigas forjadas em todas as suas plantas no mundo, e esta foi a escolhida para este estudo. O corpo de provas possui um entalhe em formato “V” e de tamanho padrão [11]. A carga é aplicada como um impacto instantâneo, realizada através de um martelo pendular balanceado. O martelo é liberado de uma altura conhecida e predeterminada atingindo o corpo de prova que fica posicionado na base. Após o impacto, o pêndulo continua seu movimento, porém em uma altura menor do que a inicial. A energia de impacto é calculada a partir da diferença das alturas inicial e final. O tamanho do corpo de prova é de 10x55x10 mm e o ensaio realizado na temperatura de 0 °C [11]. Essa temperatura foi escolhida porque no

Brasil não temos temperatura de trabalho muito mais baixa que esse valor. Se a viga fosse utilizada na Europa, nos EUA ou em outros países mais frios da América Latina, o ensaio de impacto seria realizado com temperaturas mais baixas.

Para o ensaio de impacto, foram utilizados 03 corpos de prova para cada temperatura de forjamento (N -75 °C, N, N +50 °C, N +100 °C), isto é, um total de 12 mostras.

O ensaio metalúrgico da microestrutura do aço foi realizado com 04 amostras da ponteira, uma para cada temperatura de forjamento. O microscópio utilizado para analisar as amostras foi o Leica DM 4000 M. Para a caracterização é realizada uma análise comparativa visual com aumentos e ataques pré-determinados para a classificação da microestrutura do corpo de prova.

O ensaio de tamanho de grão [12] foi realizado através da preparação do corpo de prova do material a ser testado e realizada uma análise comparativa visual do gabarito padrão, aumentos padrões e ataques padrões à superfície analisada em microscópio. O equipamento utilizado para analisar as amostras foi um microscópio modelo Leica DM 4000 M.

O aço baixo carbono e baixa liga é um aço relativamente resistente com um baixo teor de carbono e um total de elementos de liga de menos de 10%p [10]. No caso da pesquisa, o aço baixo carbono e de baixa liga utilizado foi o aço proprietário FB70. Ele possui em sua composição o Mn, Si e V como elementos de liga.

Tabela 1: Composição química da viga.

Composição Química (%p/p)														
Corrida	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	V	Nb	Ti	N
Corrida 1	0,190	1,700	$\frac{0,01}{3}$	0,001	0,400	0,030	$\frac{0,20}{0}$	0,011	0,021	0,030	0,150	0,002	0,005	0,0184
Especificação	Min	-	1,400	-	-	0,200	-	-	-	0,020	-	-	-	-
	Max	0,220	1,800	$\frac{0,05}{0}$	0,050	0,500	-	-	-	-	-	0,180	-	-

Fonte: Resultados originais da pesquisa.

A composição química das corridas utilizadas atende o especificado pelo fabricante das vigas forjadas, conforme última linha da Tabela 1.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a produção das vigas forjadas nas diferentes temperaturas de forjamento (N -75 °C, N, N +50 °C e N +100 °C) foram realizados os ensaios destrutivos para caracterização das propriedades mecânicas do produto.

3.1 Ensaio de tração

As tabelas 2 e 3 apresentam os resultados obtidos para os ensaios de tração:

Tabela 2: Resultados dos ensaios de tração.

Amostra	Temperatura de Forjamento [°C]	Limite de escoamento [Mpa]	Resistencia a Tração [Mpa]	Alongamento [%]
1	N -75	494	696	22
2	N	499	695	22
3	N +50	539	746	20
4	N +100	516	720	21
Especificação de Projeto		≥ 490	≥ 608	≥ 20

Fonte: Resultados originais da pesquisa.

Pode-se observar que os maiores valores para limite de escoamento e resistência a tração e menor alongamento são vistos nas amostras forjadas em maiores temperaturas. Para a amostra forjada com a temperatura 75 °C menor que a temperatura nominal (N), o limite de escoamento ficou próximo ao mínimo valor especificado em projeto.

3.2 Ensaio de impacto

Analisando a tabela 3, a redução da energia de impacto com o aumento da temperatura de forjamento das vigas pode ser percebida facilmente.

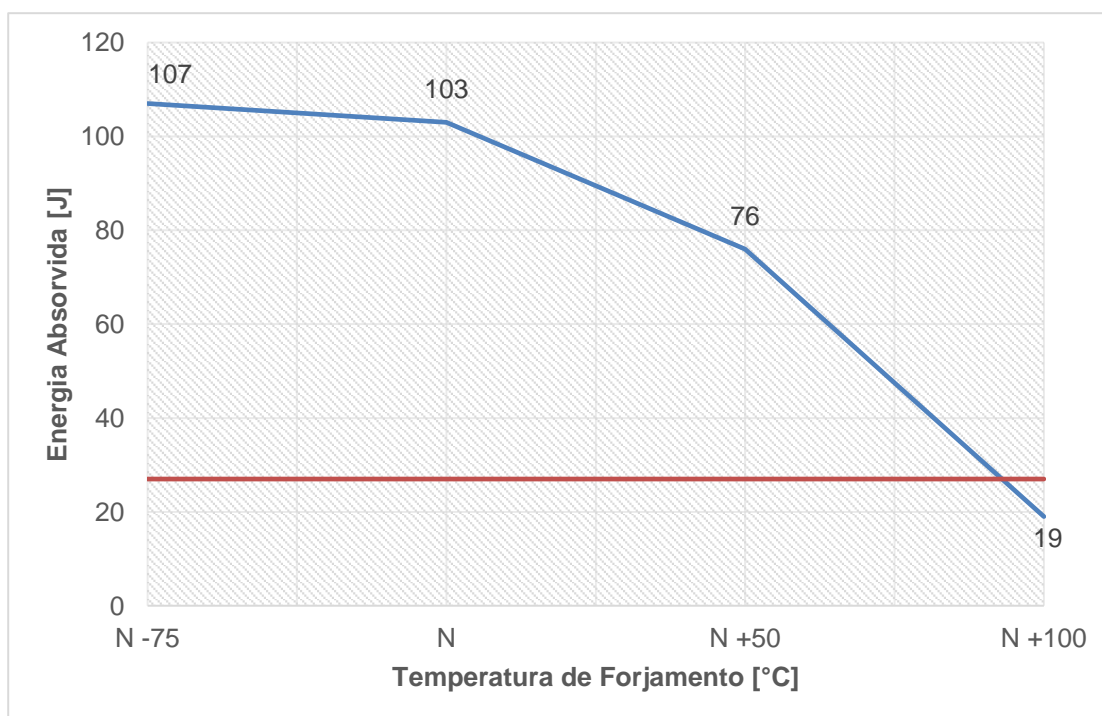
Tabela 3: Resultados dos ensaios de impacto Charpy a 0°C.

Amostra	Temperatura de Forjamento [°C]	Energia absorvida [J]	Energia absorvida [J]	Energia absorvida [J]	Energia Média absorvida [J]
1	N -75	100	132	90	107
2	N	115	79	114	103
3	N +50	62	62	104	76
4	N +100	21	31	7	19
Valor de Referência ≥ 27 J					

Fonte: Resultados originais da pesquisa.

O gráfico 1 apresenta a correlação observada entre a energia absorvida ao impacto média e a temperatura de forjamento das amostras ensaiadas. Apesar de não ser especificado em projeto, o fabricante dos eixos forjados possui o valor de referência mínimo de 27 J. Pode-se verificar que a energia absorvida na menor temperatura de forjamento (N-75°C) é a mais alta com 107 J, diminuindo conforme a temperatura de forjamento é aumentada passando pela temperatura nominal com uma energia absorvida muito semelhante com 103 J, posteriormente com uma redução brusca atingindo 76 J aumentando a temperatura em 50°C, e finalmente com 19 J na maior temperatura de forjamento (N+100°C).

Gráfico 1: Correlação entre energia de resistência ao impacto e temperatura de forjamento.



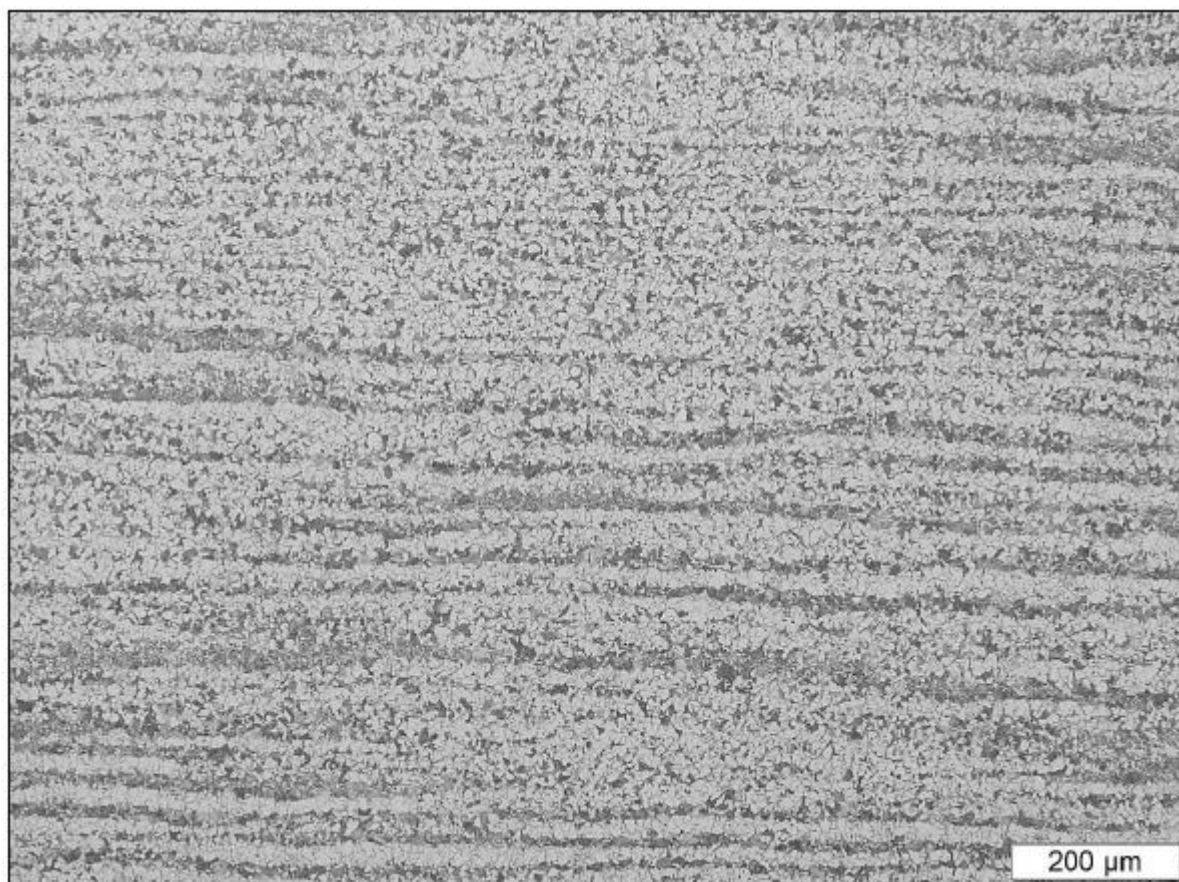
Fonte: Resultados originais da pesquisa.

3.3 Ensaio metalográfico

Os corpos de prova utilizados na análise metalográfica foram os mesmos provenientes do ensaio de impacto. A região das amostras analisada foi a região central da espessura de parede da viga forjada.

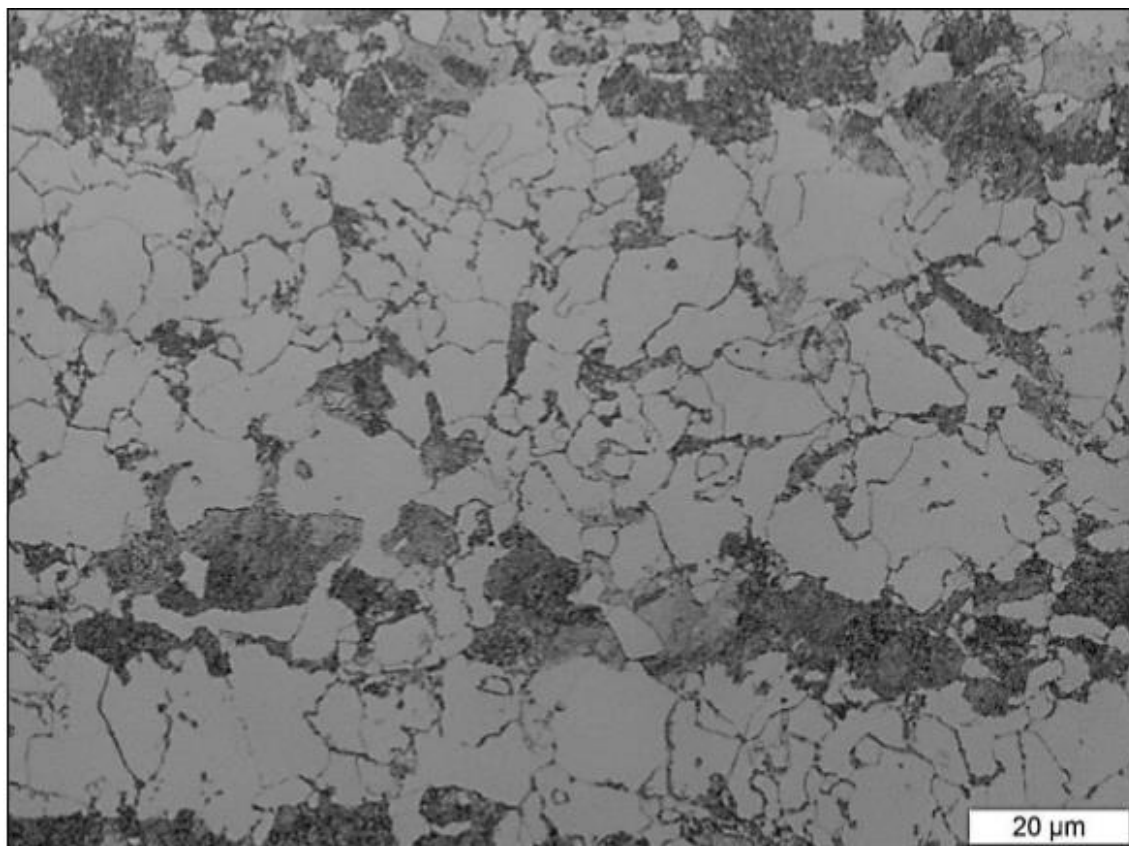
Na análise de microestrutura do material foram utilizadas as ampliações 100x e 1.000x. Para a análise de tamanho de grão, foi escolhido o método comparativo especificado na norma ASTM E112 [12]. As figuras a seguir (Figura 4 a Figura 11) apresentam a microestrutura observada nas amostras e a tabela 4 apresenta os resultados de tamanho de grão.

Figura 4: Amostra forjada a N -75 °C, ampliação de 100x.



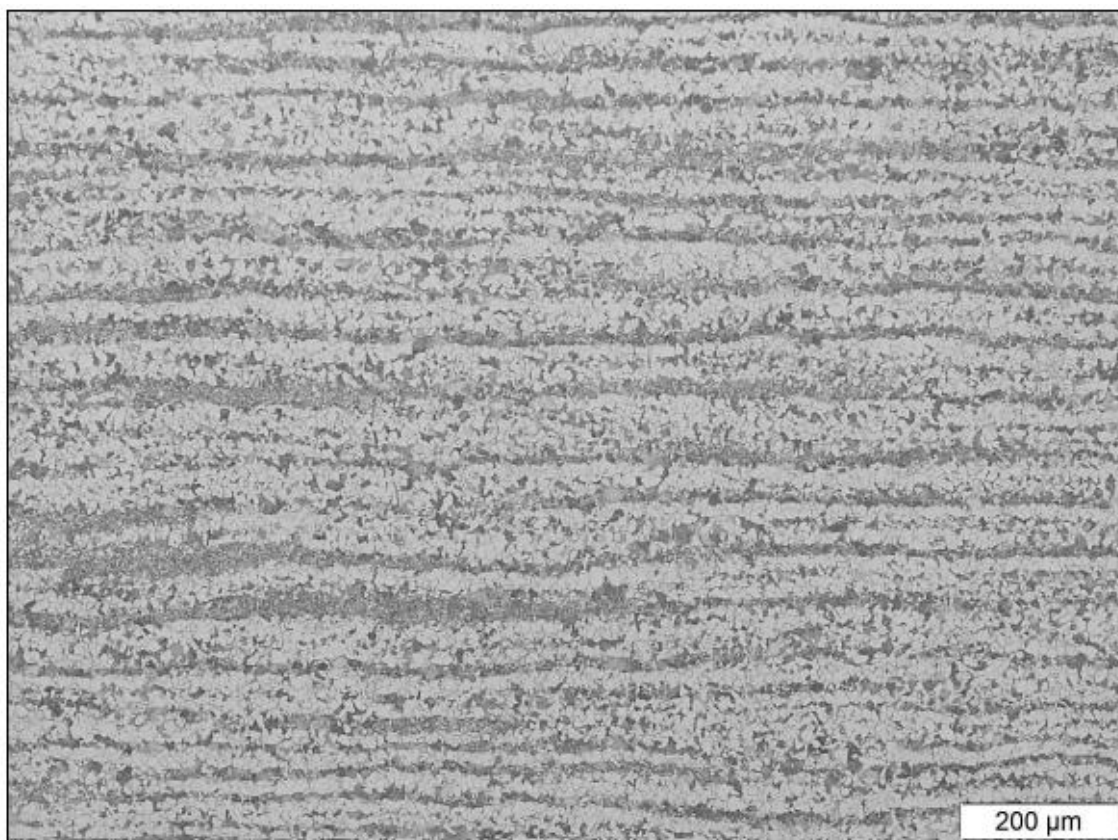
Fonte: Resultados originais da pesquisa.

Figura 5: Amostra forjada a N -75 °C, ampliação de 1.000x.



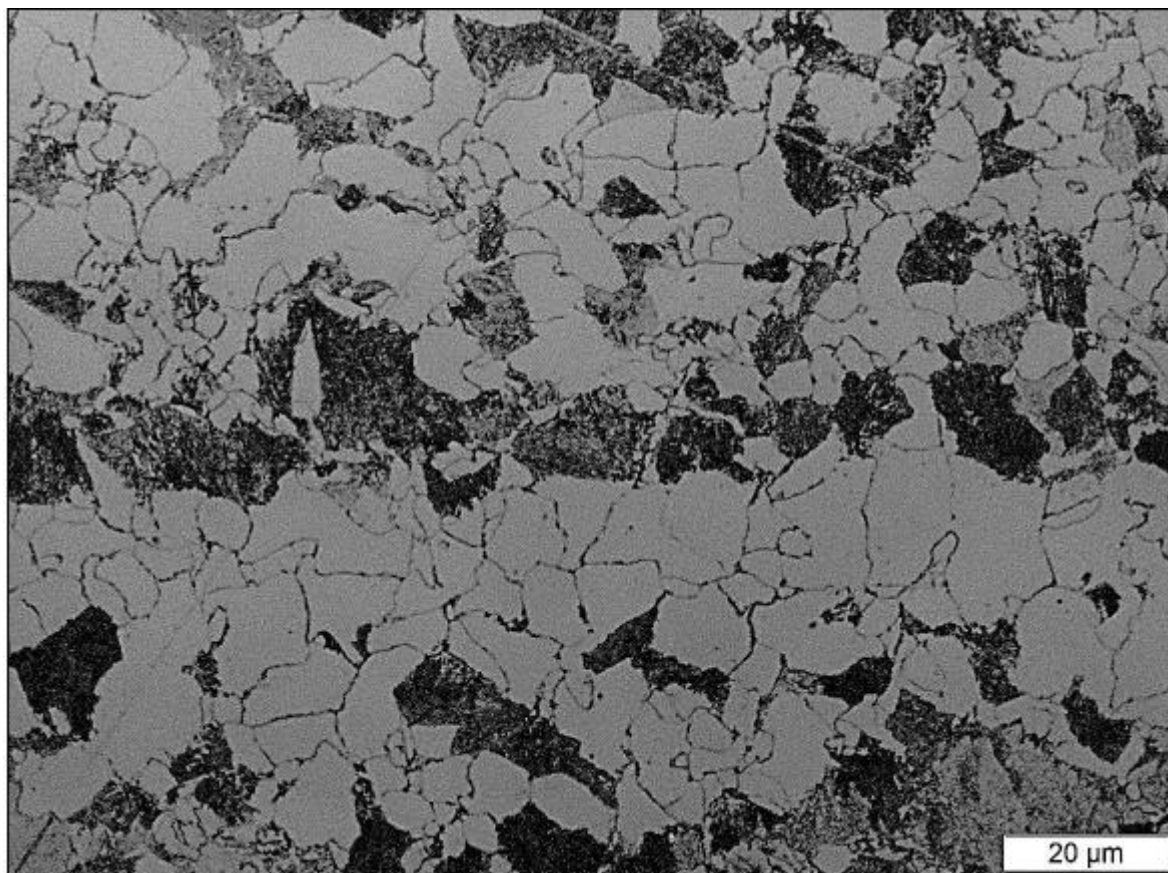
Fonte: Resultados originais da pesquisa.

Figura 6: Amostra forjada a N °C, ampliação de 100x.



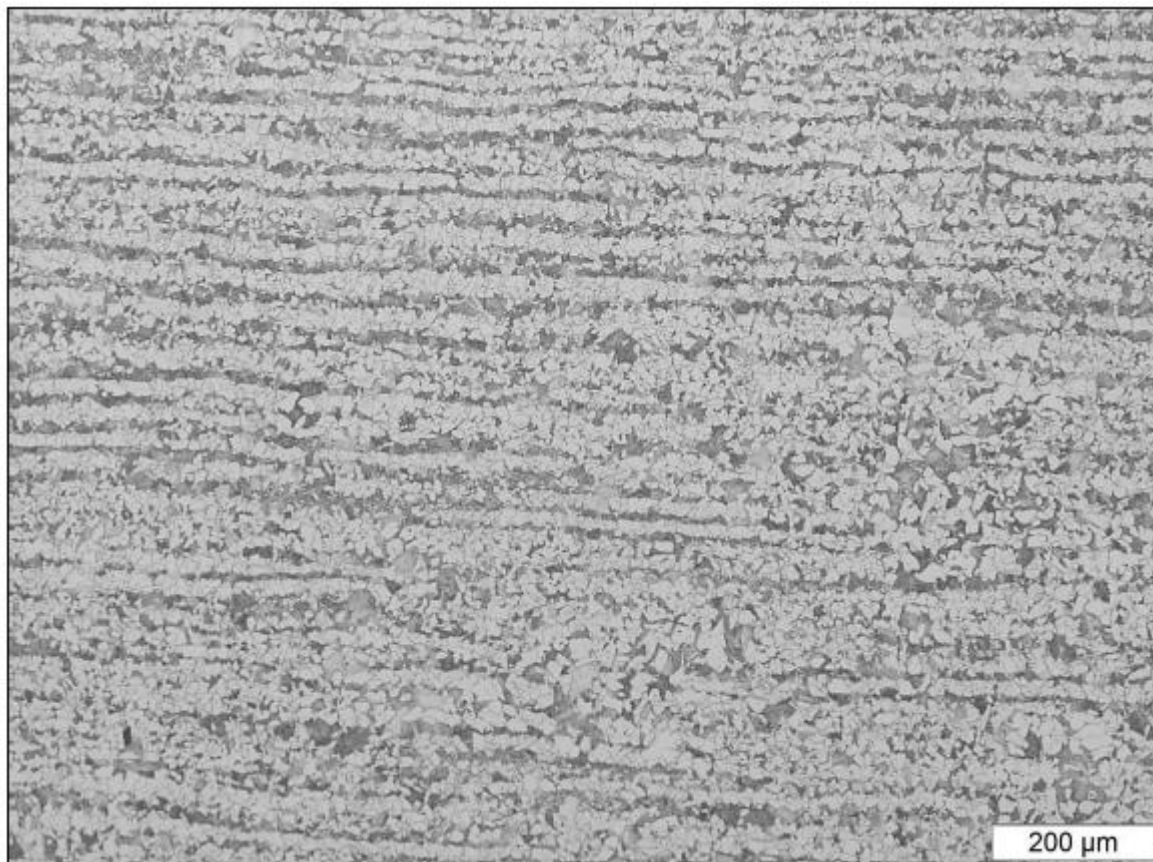
Fonte: Resultados originais da pesquisa.

Figura 7: Amostra forjada a N °C, ampliação de 1.000x.



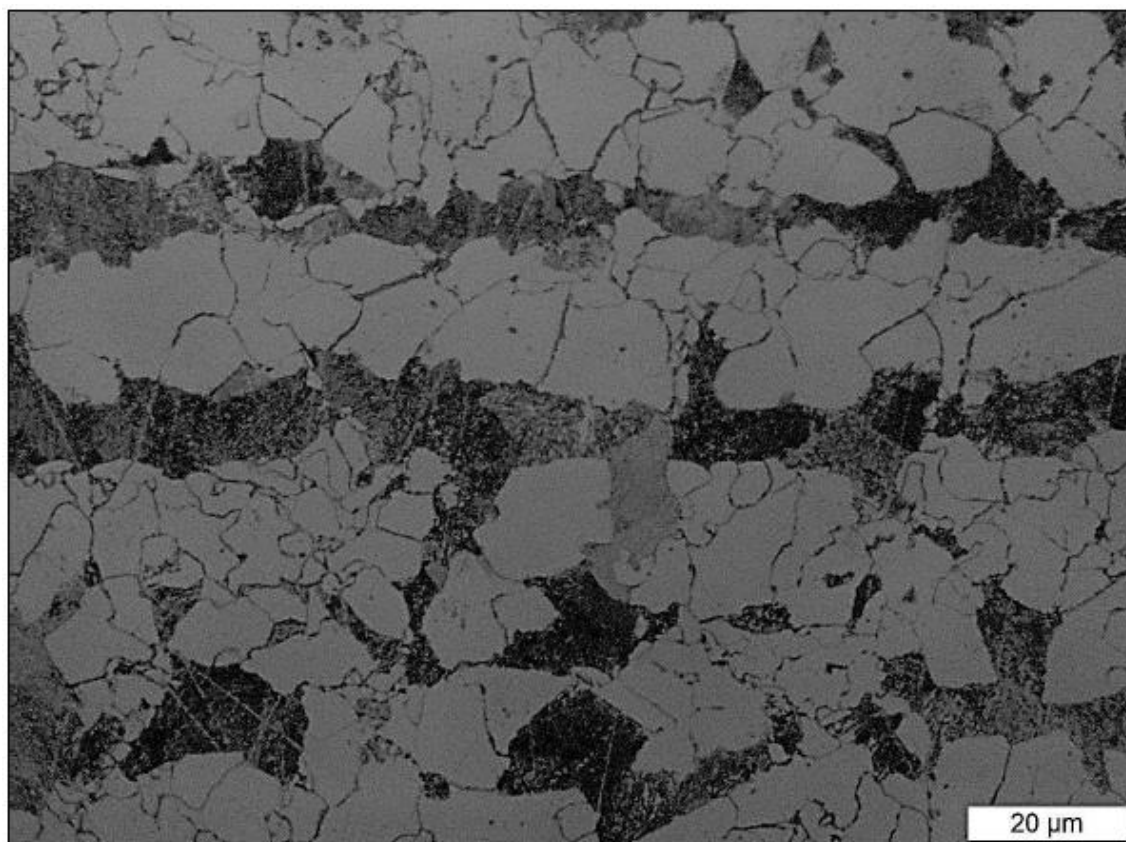
Fonte: Resultados originais da pesquisa.

Figura 8: Amostra forjada a N +50 °C, ampliação de 100x.



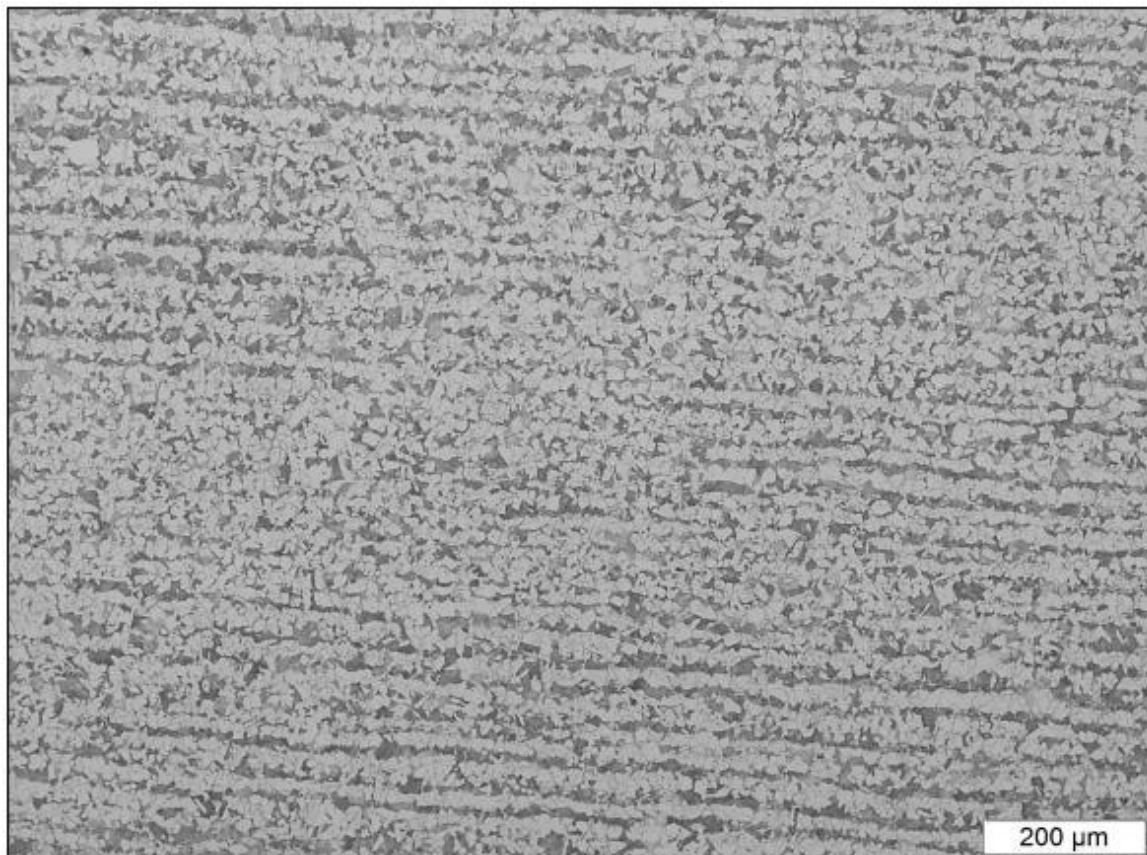
Fonte: Resultados originais da pesquisa.

Figura 9: Amostra forjada a N +50 °C, ampliação de 1.000x.



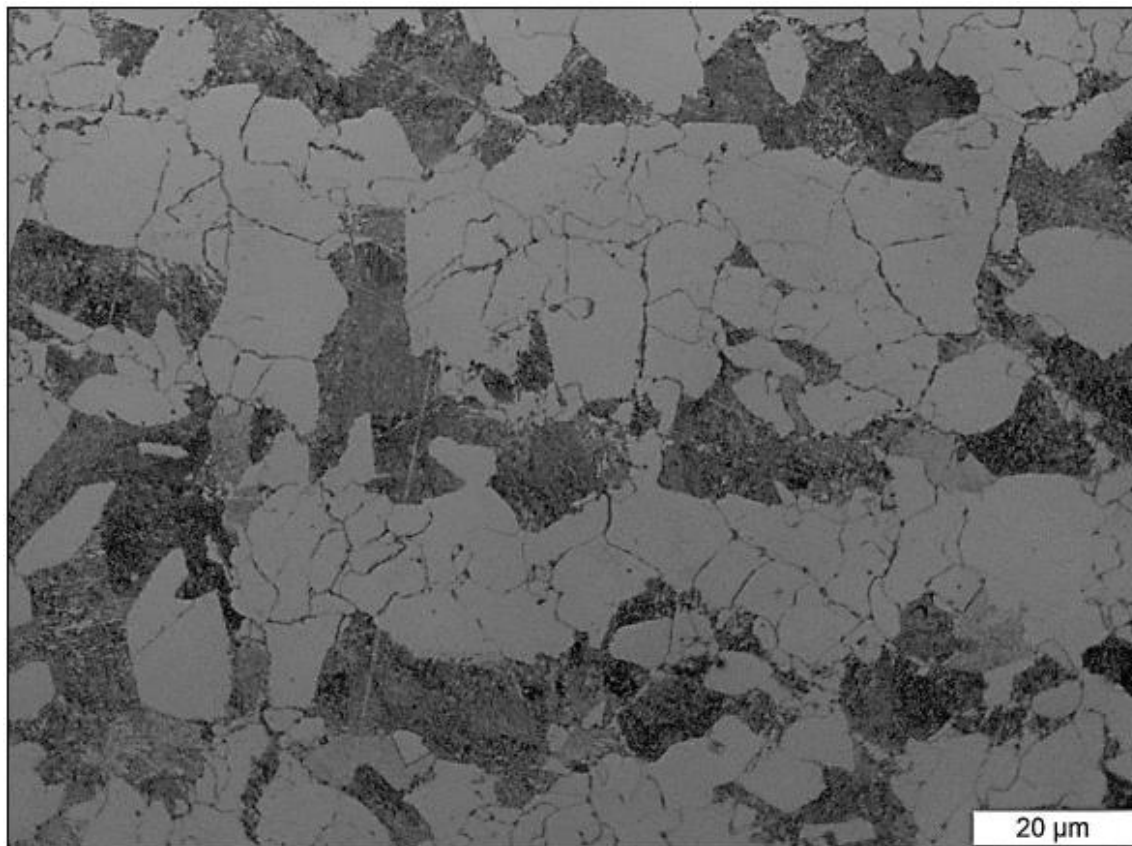
Fonte: Resultados originais da pesquisa.

Figura 10: Amostra forjada a N +100 °C, ampliação de 100x.



Fonte: Resultados originais da pesquisa.

Figura 11: Amostra forjada a N +100 °C, ampliação de 1.000x.



Fonte: Resultados originais da pesquisa.

Tabela 4: Tamanho de grão das amostras.

Temperatura de Forjamento [°C]	Tamanho de grão	
	Mínimo	Máximo
N -75	8,5	9,0
N	8,5	8,5
N +50	7,5	8,0
N +100	8,0	8,0

Fonte: Resultados originais da pesquisa.

A microestrutura dos materiais é constituída de ferrita, perlita e bainita. Analisando-se as imagens de microestrutura é possível constatar um pequeno aumento no tamanho de grão nas amostras forjadas a N +50 °C e N +100 °C. Em relação àquelas forjadas a temperaturas mais baixas, o que é constatado na tabela 4.

3.4 CONCLUSÃO

As amostras forjadas em temperatura mais baixas (N -75 °C e N) apresentaram maior energia de resistência ao impacto, e aparentemente grãos mais refinados. Por outro lado, as amostras forjadas em temperatura mais alta (N +50 °C e N +100 °C) apresentaram menor energia de impacto e tamanho de grãos ligeiramente mais grossos.

Os piores resultados de energia absorvida ao impacto foram obtidos com as amostras de N +100 °C. Contudo, considera-se com base nos resultados apresentados que a deterioração da energia de impacto da ponteira do material estudado já começa a ocorrer a aproximadamente N +50 °C.

Pode-se assim concluir que para fins de ação imediata quanto ao forjamento do material em questão, faz-se necessário realizá-lo em temperaturas abaixo de N +50 °C de modo que a capacidade de absorção de energia ao impacto das peças não seja reduzida em excesso, o que tornaria sua aplicação insegura e aumentaria os riscos de quebras e acidentes com o material fornecido.

REFERÊNCIAS

- [1] VALLOUREC Soluções Tubulares do Brasil S.A. Catálogo de Tubos Forjados. Belo Horizonte: 2015.
- [2] WEN, Xin-li; JIANG, Zhen Mei, Bo; ZHANG, Li-chong; LIU, Ya-zheng. Effect of normalizing temperature on microstructure and mechanical properties of a Nb-V microalloyed large forging steel. *Materials Science & Engineering A*, V. 671, 2016, p. 233-243.
- [3] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials: referências: E23-23a. West Conshohocken: ASTM, 2023.
- [4] HORTON, Philippa M.; ALLWOOD, Julian M. Yield improvement opportunities for manufacturing automotive sheet metal components. *Journal of Materials Processing Technology*, V. 249, 2017, p. 78-88.
- [5] WOLFGARTEN, Martin; HIRT, Gerhard. New method for the manufacturing of curved workpieces by open die forging. *CIRP Annals*, V. 65, l. 1, 2016, p. 285–288.
- [6] BEHRENS, Bernd-Arno; BRUNOTTE, Kai; WESTER, Hendrik; KOCK, Christoph. Experimental investigations on the interactions between the process parameters of hot forming and the resulting residual stresses in the component. *Procedia Manufacturing*, V. 50, 2020, p. 706–712.
- [7] ERIKSSON, Emil; HANNING, Fabian; ANDERSSON, Joel; COLLIANDER, Magnus Hörnqvist. Dynamic recrystallization during hot compression of Ni-based superalloy Haynes 282. *Journal of Alloys and Compounds*, V. 960, 2023, p. 170837.
- [8] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products: referências: A370-20. West Conshohocken: ASTM, 2020.

- [9] XU, Chung; REN, Guangsheng; GUO, Yongqiang; REN, Weiwei; ZHANG, Ya. Tube necking extrusion principle and forming process of trailer rear axle. *Procedia Engineering*, V. 81, 2014, p. 634-640.
- [10] CALLISTER Ciência dos materiais ed 11.
- [11] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials: referências: E23-23a. West Conshohocken: ASTM, 2023.
- [12] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard test methods for determining average grain size: referências: E112-13. West Conshohocken: ASTM, 2013.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 INTRODUÇÃO AOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os principais resultados dos estudos realizados sobre as vigas forjadas de aço baixo carbono FB70 sem tratamento térmico final. Os resultados obtidos nos dois artigos científicos são comparados com dados da literatura, ressaltando as vantagens do processo proposto e suas implicações tanto do ponto de vista científico quanto prático.

A quantidade de corpos de prova utilizados limitada pela disponibilidade das amostras para a realização do estudo.

4.2 RESULTADOS SINTETIZADOS DOS ARTIGOS

A Tabela 1 resume os principais resultados obtidos nos dois artigos científicos. As propriedades mecânicas e microestruturais são destacadas para evidenciar o desempenho das vigas sem o tratamento térmico de normalização, comparando com as especificações padrão e referências da literatura.

Tabela 1: Comparação das propriedades de cada artigo e referências da literatura.

Propriedade	Artigo 1: Caracterização		Artigo 2: Resistência ao Impacto		Referências da Literatura
	Resultado	Desvio Padrão	Resultado	Desvio Padrão	Resultado
Limite de Escoamento [Mpa]	508	Não disponível	539	Não aplicável**	490 [3]
Resistência à Tração [Mpa]	687	Não disponível	746	Não aplicável**	608 [3]
Alongamento [%]	21	Não disponível	20	Não aplicável**	20 [3]
Dureza Rockwell B [HRB]	194	Não disponível	Não disponível	Não disponível	170 [3]
Energia de Impacto [J]	19*	Não disponível	76	24.25	27 [5]
Tamanho de Grão [Ponteira]	6.5 - 9.0	Não disponível	7.5 - 8.0	0.35	6 [6]
Tamanho de Grão [Corpo]	6.0 - 9.5	Não disponível	Não disponível	Não disponível	Não disponível

* Obtido no artigo 2 através de simulação da temperatura de forjamento.

** Realizado ensaio em apenas 1 amostra.

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados indicam que o forjamento sem tratamento térmico final mantém as propriedades mecânicas dentro dos padrões exigidos para aplicações estruturais, sendo comparáveis ou até superiores aos valores reportados na literatura. As seguintes vantagens foram identificadas:

1. Redução de Custos e Tempo de Produção: A eliminação do tratamento térmico de normalização simplifica o processo produtivo, reduzindo custos com energia e tempo de processamento. Esse aspecto foi destacado também por Rodrigues (2016), que relatam uma redução de 15% nos custos totais de produção em processos similares, e cerca de 3 dias entre tramites burocráticos e transporte ao local de tratamento térmico.

2. **Manutenção das Propriedades Mecânicas:** O limite de escoamento e a resistência à tração obtidos foram consistentes com os valores padrão para aços de baixo carbono, confirmando que o resfriamento ao ar após o forjamento é eficaz para manter as características desejadas. A resistência à tração de 746 MPa supera os 608 MPa especificados pela engenharia de produto conforme reportado em catálogo do fabricante [3], reforçando a adequação do método. O limite de escoamento de 539 MPa também se encontrou acima do mínimo de 490 MPa. A dureza após o forjamento de 194 HRB se deu como uma característica diretamente relacionada a resistência à tração, também supera os valores mínimos especificados do produto de 170 HRB. O alongamento das vigas forjadas sem o tratamento térmico atingiu os 20% mínimos requeridos em projeto conforme esperado pois após a normalização o valor foi de 25%.
3. **Impacto Controlado pela Temperatura de Forjamento:** O segundo artigo demonstrou que a resistência ao impacto é altamente dependente da temperatura de forjamento. Os valores de energia de impacto se mantiveram bem acima do limite mínimo especificado (≥ 27 J) para temperaturas de forjamento controladas, corroborando com as especificações da norma DIN EN 10297-1, que indicam a importância de um controle rigoroso de temperatura. Os maiores valores de impacto foram obtidos nos menores valores de limite de escoamento e resistência a tração, e maiores tamanhos de grão. Todos esses resultados obtidos forjados nas menores temperaturas.
4. **Microestrutura Adequada:** A análise microestrutural mostrou que os tamanhos de grão das vigas sem tratamento térmico estão dentro das faixas aceitáveis encontradas na literatura, como especificado na norma DIN EN 10210-1. O tamanho de grão das amostras com tratamento térmico apresentou uma maior homogeneidade e grãos mais refinados devido a normalização, no entanto o tamanho de grão das amostras sem o tratamento térmico também se apresentou refinado e apresentou pequena dispersão no artigo 2. A diferença do tamanho de grão entre a ponteira e o

corpo das amostras sem normalização é pequena entre elas (6.5 a 9.0 e 6.0 a 9.5). A estabilidade microestrutural com grãos finos contribui para a resistência mecânica e durabilidade do material.

5. Comparação com Tratamentos Convencionais: Enquanto o tratamento térmico de normalização busca homogeneizar a microestrutura e reduzir tensões internas, os resultados deste estudo sugerem que o controle adequado do processo de forjamento é suficiente para atender às exigências estruturais, eliminando a necessidade de um passo adicional de tratamento térmico. Turra (2021) também destaca que o forjamento controlado pode substituir o tratamento térmico em várias aplicações sem perda significativa de qualidade.

4.4 SUGESTÕES FUTURAS

Os resultados deste estudo sugerem que o forjamento sem tratamento térmico final é uma alternativa viável e eficiente para a produção de vigas de aço de baixo carbono, atendendo às especificações técnicas e reduzindo os custos operacionais. Recomenda-se a implementação de controles rigorosos da temperatura de forjamento para assegurar a resistência ao impacto e manter as propriedades mecânicas desejáveis. A continuidade desta pesquisa pode focar em simulações computacionais e ensaios de fadiga para explorar mais detalhadamente os limites do processo proposto. Adicionalmente, seriam recomendados ensaios de tensão residual após o forjamento e análises em microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia eletrônica de transmissão (MET) para investigar as alterações microestruturais do aço.

5.4 EXPLICAÇÕES DAS MELHORIAS

Os resultados deste estudo indicam que o forjamento sem tratamento térmico final pode ser uma alternativa viável e eficiente para a produção de vigas de aço baixo carbono, atendendo às especificações técnicas e reduzindo custos operacionais.

Recomenda-se a aplicação de controles rigorosos de temperatura de forjamento para garantir a resistência ao impacto e manter as propriedades mecânicas desejáveis

- Tabela Sintética: A tabela facilita a visualização dos principais resultados, comparando-os com referências da literatura, o que enriquece a discussão e valida os achados.

- Discussão Detalhada: A análise aborda as vantagens específicas do processo sem tratamento térmico, enfatizando as implicações práticas e científicas.

- Comparação com a Literatura: Inclui comparações diretas com estudos anteriores, fortalecendo a relevância dos resultados e destacando a contribuição da pesquisa.

Essa abordagem oferece uma discussão robusta e bem fundamentada sobre as vantagens do forjamento sem tratamento térmico, integrando os achados dos artigos com o contexto mais amplo da engenharia de materiais.

5 CONCLUSÕES

Esta dissertação apresentou uma investigação detalhada sobre as propriedades mecânicas e microestruturais de vigas forjadas de aço baixo carbono FB70 sem tratamento térmico final, estruturando os resultados em dois artigos científicos que refletem as principais etapas do estudo.

No primeiro artigo, "Caracterização de Viga Forjada sem Tratamento Térmico Final", foi demonstrado que a eliminação do processo de normalização não compromete as propriedades mecânicas essenciais das vigas, como o limite de escoamento mínimo de 490 MPa, resistência à tração mínima de 610 MPa, alongamento mínimo de 20%, e dureza Rockwell B mínima de 87 HRB. A análise microestrutural indicou uma matriz de ferrita e perlita com tamanhos de grão variando entre 6 e 10 no corpo da viga e entre 65 e 95 na ponteira. Esses achados evidenciam que o forjamento a quente seguido de resfriamento ao ar mantém a integridade estrutural necessária, permitindo a redução de custos e a simplificação do processo de fabricação sem comprometer o desempenho.

No segundo artigo, "Correlação entre a Resistência ao Impacto e a Temperatura de Forjamento em Aço Baixo Carbono", foi analisada a relação entre a temperatura

de forjamento e a resistência ao impacto das vigas. Os ensaios Charpy revelaram que a energia de impacto média variou de 107 J na temperatura nominal menos 75 °C (N -75 °C) para 19 J na temperatura nominal mais 100 °C (N +100 °C). Esse comportamento destaca a importância do controle rigoroso da temperatura de forjamento, pois temperaturas mais altas resultam em uma tenacidade significativamente reduzida devido ao crescimento excessivo dos grãos.

Implicações Científicas e Práticas:

Contribuição para a Engenharia de Materiais: A pesquisa ampliou o entendimento sobre a influência das condições de forjamento nas propriedades mecânicas e microestruturais das vigas de aço FB70, particularmente na ausência de tratamento térmico de normalização.

Diretrizes para Processos Industriais: Os resultados recomendam que a temperatura de forjamento seja mantida abaixo de N +50 °C para preservar a resistência ao impacto e a estrutura do grão, garantindo a segurança e durabilidade do produto final.

Avanços Tecnológicos e Competitividade: A possibilidade de eliminar o tratamento térmico final sem comprometer as especificações técnicas permite uma redução expressiva nos custos de produção e aumento da competitividade no mercado.

Conclusão Prática e Empresarial: Após a retirada do tratamento térmico final, foi possível reduzir o custo de produção da viga forjada, atendendo a todas as propriedades mecânicas exigidas em projeto. A eliminação dos fornos de tratamento térmico permitiu liberar horas de operação, gerando mais faturamento para a empresa. Além desse benefício indireto, com a redução de custos, foi possível obter mais competitividade no mercado e aumentar a participação do produto. Os resultados confirmam que os métodos adotados são adequados para manter a viabilidade técnica e econômica das vigas forjadas, alinhando-se aos objetivos de otimização de processos.

REFERÊNCIAS

Livro:

- [1] FERREIRA, João. **Estratégias de Mercado na Era Global**. 2. ed. São Paulo: Editora Exemplo, 2019.
- [2] SILVA, Maria. **Competitividade no Mercado Automotivo**. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Exemplo, 2021.
- [3] VALLOUREC Soluções Tubulares do Brasil S. A. Disponível em: <www.vallourec.com/app/uploads/sites/2/2023/10/Forged-Tubular-Components_brochure.pdf>. Acesso em: 3 set 2024.
- [4] SILVA, João. **Processos de Laminação na Indústria Metalúrgica**. 1. ed. São Paulo: Editora Exemplo, 2020.
- [5] EUROPEAN STANDARD. Seamless circular steel tubes for mechanical and general engineering purposes – Technical delivery conditions Part 1: Non-alloy and alloy steel tubes. referências: 10297-1. Bruxelas: EN, 2003.
- [6] EUROPEAN STANDARD. Hot finished structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels – Part 1: Technical delivery conditions. referências: 10210-1. Bruxelas: EN, 2006.
- [7] RODRIGUES, Thiago. **Análise comparativa de custos de produção de chapas grossas entre o processo de tratamento térmico convencional ou pelo processo de resfriamento acelerado**. 2016. Dissertação – Departamento de ciência da computação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
- [8] TURRA, Cristiano. **Caracterização mecânica e metalúrgica de um aço bainítico de resfriamento contínuo aplicado no processo industrial de forjamento a quente**. 2021. Dissertação – Departamento de pós-graduação em engenharia de minas, metalúrgica e de materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.