UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA

NÍCHOLAS JOÃO RAMOS SPAGNOL

Influência do processo de fabricação do disco na vida em fadiga de rodas para veículos comerciais fabricadas com o aço S355JR

Lorena
2014

NÍCHOLAS JOÃO RAMOS SPAGNOL

Influência do processo de fabricação do disco na vida em fadiga de rodas para veículos comerciais fabricadas com o aço S355JR

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais na área de materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos.

Orientador: Dr. Carlos Antônio Reis Pereira Baptista

Edição reimpressa e corrigida

Lorena

Novembro, 2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Catálogo na Publicação

Elaborada pela Biblioteca Especializada em Engenharia de Materiais
Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo

Spagnol, Nicholas João Ramos

Influência do processo de fabricação do disco na vida em fadiga de rodas para veículos comerciais fabricadas com o aço S355JR/ Nicholas João Ramos Spagnol.— ed. reimp.,corr.— 2014.

112p. : il.

Dissertação (Mestre em Ciências – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais. Área de Concentração: Materiais Metálicos, Cerâmicos e Poliméricos) – Escola de Engenharia de Lorena - Universidade de São Paulo, 2014.

Orientador: Carlos Antônio Reis Pereira Baptista

1. Repuxamento 2. Vida em fadiga 3. Curva S-N 4. Aços automotivos 5. Encruamento I. Título.

CDU 669.018

Aos meus pais, JerSSI Ramos Spagnol e Rui Spagnol, pelo incentivo e motivação.

À minha esposa Renata M. Okuma Spagnol, pelo apoio e companheirismo.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Carlos Antônio Reis Pereira Baptista (EEL/USP) pela orientação.

À empresa IOCHPE MAXION S/A, em especial à Engenharia de Produto – Rodas, Marcelo Yumoto Graziani e Carlos Eduardo Lopes pela oportunidade de realização do Mestrado.

À Escola de Engenharia de Lorena – EEL/USP pela oportunidade de realização do Mestrado.

Aos amigos Kahl Zilnyc e Davison Almeida pela ajuda para realização das análises.

Aos colegas da linha de Disco S/C pela ajuda para obtenção das amostras.

A todos os professores do curso de Mestrado pelos conhecimentos transmitidos.

Aos colegas, amigos e familiares pela compreensão e apoio.

A todos que, mesmo não sendo citados, de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

“Nas grandes batalhas da vida, o primeiro passo para a vitória é o desejo de vencer!”

Mahatma Gandhi

RESUMO

SPAGNOL, N. J. R. **Influência do processo de fabricação do disco na vida em fadiga de rodas para veículos comerciais fabricadas com o aço S355JR**. 2014. 112p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena, Lorena, 2014.

A disputa por espaço no mercado automotivo tem sido intensificada a cada ano. A cobrança por componentes mais leves e de menor custo aliados à preocupação ambiental têm exigido a busca de novas alternativas de materiais e/ou processos produtivos mais eficientes. Uma das respostas a estas tendências é o aumento significativo no uso de aços de alta resistência baixa liga e *dual phase* nos últimos anos a fim de reduzir peso dos componentes. Entretanto, o custo destes aços no Brasil está entre 20 a 40% maior que os aços baixo carbono. Desta forma, para alguns segmentos está descartada esta hipótese, pois o mercado brasileiro exige redução de peso aliada à redução de custo. Sendo assim, a melhoria do processo produtivo ganha força nesta disputa. O processo de repuxamento (*spinning*) tem sido utilizado há anos para produção do componente disco de rodas para veículos comerciais e é um processo de trabalho à frio severo, o que pode resultar em aumento das propriedades mecânicas do material e redução do uso de matéria-prima em função da porcentagem da redução de espessura proposta. Sendo assim, neste trabalho foram analisadas 3 condições de repuxamento de disco, 41% de redução de espessura, 52% de redução de espessura e 64% de redução de espessura a fim de se obter o limite de redução de espessura do material S355JR por meio do processo de repuxamento do disco sem que haja perda das propriedades mecânicas do mesmo e, assim, gerar aumento da vida em fadiga do componente roda e redução de peso. Para isso, foram realizados os seguintes ensaios: análise de composição química, análise de microdureza, análise metalográfica, ensaios de tração e obtenção das curvas tensão x deformação, ensaios de fadiga por flexão alternada ($R=-1,0$) e obtenção das curvas S-N. A análise da composição química do aço S355JR verificou que o mesmo atende o especificado em norma DIN EN-10025-2. Por meio da análise metalográfica foi verificado que as fases presentes nos materiais analisados eram ferrita e perlita dispersa na matriz e nos contornos de grão. Através dos ensaios realizados foi observado que houve aumento das propriedades mecânicas do material para as amostras repuxadas e também aumento na vida em fadiga dos mesmos. Além disso, foi observado aumento das propriedades mecânicas e da vida em fadiga para a amostra com maior porcentagem de redução de espessura.

Palavras-chaves: Repuxamento, Vida em fadiga, Curva S-N, Aços automotivos, Encruamento.

ABSTRACT

SPAGNOL, N.J.R. **The influence of the disc manufacturing process on the fatigue life of the commercial vehicle wheels manufactured using S355JR steel.** 2014. 112p. Dissertation (Master of Science). Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena, Lorena 2014.

The battle for space in the automotive market is becoming fiercer. Calls for lighter and cheaper components, and also environmental concerns, have led to the search for alternative materials and more effective processes. One of the answers is the recent significant increase in sales of dual phase and high strength low alloy steel, which has reduced the weight of the products. However, in Brazil, the price of these steels is 20% to 40% higher than low carbon steel price and thus it is necessary to look for other options. On this way, for some segments this hypothesis is ruled out because the Brazilian market requires weight reduction combined to cost reduction. Thus, the improvement of the manufacturing process gains strength in this battle. The spinning process has long been used to make the disc of commercial vehicle wheels. It is a hard cold working process which could achieve an improvement of the material mechanical properties and a raw material reduction based on the thickness reduction during the process. Thus, three spun disc conditions were analyzed, corresponding to 41, 52% and 64% of thickness reduction, in order to find out a reasonable limit of thickness reduction with no loss of the material mechanical properties, purposing to increase the fatigue life of the wheel and reducing the wheel weight. The following tests were carried out: chemical composition analysis, metallographic analysis, tensile tests to obtain the stress v strain curves, and fatigue tests by alternated bending ($R=-1.0$) to obtain the S-N curves. The chemical composition analysis of the S355JR steel proved that it met the DIN EN10025-2 standard. Through metallographic analysis, it was confirmed that, for S355JR steels, whose microstructure is ferrite and perlite, the perlite was near the grain boundaries. Throughout the realized tests, it was observed that there was an increasing of the mechanical properties and the fatigue life of the spun samples. In addition, the mechanical properties and fatigue life of the sample with 64% of thickness reduction had increased more than the others spun samples had.

Keywords: Spinning, Fatigue life, SN curve, Automotive steels, Strain hardening.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo repuxamento de disco.	22
Figura 2 – Roda e seus componentes – (a) componente aro, (b) componente disco e em (c) componente roda.....	24
Figura 3 – Perfil de aro sem câmara em comparação com perfil de aro com câmara.....	25
Figura 4 – Perfil de roda utilizando disco com perfil repuxado (processo de <i>spinning</i>).	26
Figura 5 – Microestrutura de um aço de baixo de carbono. Em (a) microestrutura inicial e em (b) microestrutura após repuxamento a frio.	29
Figura 6 – Exemplo do processo de repuxamento de uma platina sob um mandril.	30
Figura 7 – Esquema de uma máquina de repuxamento	31
Figura 8 – Mandril com dois rolos de repuxamento.....	32
Figura 9 – Modos de falha típicos nos componentes de repuxo.....	32
Figura 10 – Formação de uma trinca de superfície devido ao deslizamento de grãos	33
Figura 11 – Curva S-N para um aço A e para um metal não-ferroso B.	36
Figura 12 – Efeito da tensão média na vida em fadiga de um componente.	38
Figura 13 – Diagrama de Haigh - comparativo equações de Goodman, Gerber e Soderberg para a tensão média de fadiga.....	38
Figura 14 – Máquina de teste Radial com duas cabeças de teste e esquema do teste de fadiga Radial.....	40
Figura 15 – Máquina de teste de <i>Cornering</i> e esquema do teste de fadiga de <i>Cornering</i>	40
Figura 16 – Princípio do processo de extrusão em canal angular	42
Figura 17 – Microestrutura do material AISI1010 (aço baixo carbono). (a) Antes da extrusão em canal angular. (b) Após extrusão em canal angular a 150°C	43
Figura 18 – Microestrutura do material 0,15%C, 0,25%Si, 1,1%Mn (aço baixo carbono). (a) Antes da extrusão em canal angular, (b) com 1 passe de extrusão em canal angular e (c) com 3 passes de extrusão em canal angular	43
Figura 19 – Esquema de obtenção dos corpos de prova. Em (a) o blank originado para repuxamento do disco, em (b) o perfil do disco repuxado e em (c) o corte da seção transversal de (b) representando a área útil para preparação dos corpos de prova.	46
Figura 20 – Esquema de obtenção dos corpos de prova para análise metalográfica e de microdureza Vickers.....	47
Figura 21 – Corpos de prova para análise metalográfica obtidos a partir da área útil do repuxamento como mostrado na Figura 19(c).	48
Figura 22 – Corpos de prova do tipo “subsize specimen” conforme norma ASTM E 8-09.	49
Figura 23 – Esquema para obtenção dos corpos de prova para ensaio de tração e de fadiga. Em vermelho, região onde foram cortados os corpos de prova.....	50
Figura 24 – Corpos de prova do tipo “subsize specimen” conforme norma ASTM E-602-96.	51
Figura 25 – Esquema do ensaio de fadiga realizado.	51
Figura 26 – Microestrutura do aço S355JR, parte plana do disco (material como recebido) de espessura 13,5mm. Ataque com reagente Nital 3%. Ampliação original 200x.	55
Figura 27 – Microestrutura do aço S355JR, parte plana do disco (material como recebido) de espessura 13,5mm evidenciando em A a determinação da razão de aspecto dos grãos. Ataque com reagente Nital 3%. Ampliação original 500x.	56
Figura 28 – Mapeamento de microdureza para a amostra de aço S355JR da parte plana do disco (material virgem).....	56

Figura 29 – Curva tensão x deformação representativa para o aço S355JR parte plana do disco (material como recebido).	57
Figura 30 – Superfície de fratura do ensaio de tração para o aço S355JR material como recebido (parte plana do disco) obtido por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Ampliação original 50x.....	59
Figura 31 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de tração para o aço S355JR parte plana do disco (material como recebido) evidenciando a presença de dimples. Comportamento de fratura dúctil. Ampliação original 2500x.	60
Figura 32 – Curva de Fadiga S-N obtida em ensaio de fadiga para o aço S355JR parte plana do disco (material como recebido).	61
Figura 33 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de fadiga para o aço S355JR parte plana do disco (material como recebido). Ampliação original 1800x.	62
Figura 34 - Microestrutura do aço S355JR região repuxada do disco com 41% de redução de espessura em relação à parte plana. Ataque com reagente Nital 3%. Ampliação original 200x.	63
Figura 35 - Microestrutura do aço S355JR região repuxada do disco com 41% de redução de espessura em relação à parte plana. Ataque com reagente Nital 3%. Ampliação original 500x.	64
Figura 36 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do aço S355JR região repuxada do disco com 41% de redução de espessura em relação à parte plana. Ataque com reagente Nital 3%. Ampliação original 2500x.	65
Figura 37 – Mapeamento da microdureza da região repuxada do disco com 41% de redução de espessura em relação à parte plana.	66
Figura 38 – Curvas tensão x deformação para o aço S355JR com redução de espessura de 41% (8,0mm) devido ao processo de repuxamento do disco.....	67
Figura 39 – Superfície de fratura do ensaio de tração para o aço S355JR perfil do disco com 41% de redução de espessura devido ao repuxamento. Imagem obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Ampliação original 50x.....	69
Figura 40 – Superfície de fratura do ensaio de tração para o aço S355JR perfil do disco com 41% de redução de espessura devido ao repuxamento. Evidenciando região de delaminação. Região A da figura 39. Imagem obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Ampliação original 1000x.....	69
Figura 41 – Superfície de fratura do ensaio de tração para o aço S355JR perfil do disco com 41% de redução de espessura devido ao repuxamento. Ênfase da região de fratura dúctil. Região B da figura 40. Imagem obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Ampliação 5000x.	70
Figura 42 – Curva de Fadiga S-N obtida em ensaio de fadiga para o aço S355JR com redução de espessura de 41% devido ao repuxamento do disco.	71
Figura 43 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de fadiga para o aço S355JR com redução de espessura de 41% devido ao repuxamento do disco. Ampliação original 50x.....	72
Figura 44 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de fadiga para o perfil do disco com redução de espessura de 41% devido ao repuxamento do disco. Região A da Figura 43. Ampliação original 600x.	73
Figura 45 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de fadiga para o perfil do disco com redução de espessura de 41% devido ao repuxamento do disco. Ampliação original 1700x.....	73

Figura 46 - Microestrutura do aço S355JR da região repuxada do disco com 52% de redução de espessura em relação à parte plana. Ataque com reagente Nital 3%. Ampliação original 200x.	75
Figura 47 - Microestrutura do aço S355JR da região repuxada do disco com 52% de redução de espessura em relação à parte plana. Ataque com reagente Nital 3%. Ampliação original 500x.	75
Figura 48 – Mapeamento da microdureza para o aço S355JR região repuxada do disco com 52% de redução de espessura em relação à parte plana.	76
Figura 49 – Curvas tensão x deformação para o aço S355JR com redução de espessura de 52% (6.5mm) devido ao processo de repuxamento do disco	77
Figura 50 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de tração para o aço S355JR com redução de espessura de 52% devido ao repuxamento do disco. Ampliação original 50x.	79
Figura 51 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de tração para o aço S355JR material com redução de espessura de 52% devido ao repuxamento do disco evidenciando comportamento de fratura dúctil – frágil. Região A da Figura 50. Ampliação original 1000x.	80
Figura 52 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de tração para o aço S355JR material com redução de espessura de 52% devido ao repuxamento do disco evidenciando comportamento dúctil. Ampliação original 2500x.	80
Figura 53 – Curva de Fadiga S-N obtida em ensaio de fadiga para o aço S355JR com redução de espessura de 52% devido ao repuxamento do disco.	81
Figura 54 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de fadiga para o aço S355JR com redução de espessura de 52% devido ao repuxamento do disco. Ampliação original 50x.	82
Figura 55 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de fadiga para o aço S355JR com redução de espessura de 52% devido ao repuxamento do disco. Ampliação original 1900x.	83
Figura 56 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de fadiga para o aço S355JR com redução de espessura de 52% devido ao repuxamento do disco. Ampliação original 1800x.	84
Figura 57 - Microestrutura do aço S355JR da região repuxada do disco com 64% de redução de espessura em relação à parte plana. Ataque reagente Nital 3%. Ampliação original 200x.	85
Figura 58 - Microestrutura do aço S355JR da região repuxada do disco com 64% de redução de espessura em relação à parte plana. Ataque reagente Nital 3%. Ampliação original 500x.	85
Figura 59 – Mapeamento da microdureza para o aço S355JR região repuxada do disco com 64% de redução de espessura em relação à parte plana.	86
Figura 60 – Curvas tensão x deformação para o aço S355JR com redução de espessura de 64% devido ao processo de repuxamento do disco.	87
Figura 61 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de tração para o aço S355JR com redução de espessura de 64% devido ao repuxamento do disco. Ampliação original 50x.	89
Figura 62 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de tração para o aço S355JR material com redução de espessura de 64% devido ao repuxamento do disco. Região A da Figura 61. Ampliação original 2500x.	89
Figura 63 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de tração para o aço S355JR material com redução de espessura de 64% devido ao repuxamento do disco. Região B da Figura 61. Ampliação original 2500x.	90
Figura 64 – Curva de Fadiga S-N obtida em ensaio de fadiga para o aço S355JR com redução de espessura de 64% devido ao repuxamento do disco.	91

Figura 65 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de fadiga para o aço S355JR com redução de espessura de 64% devido ao repuxamento do disco. Ampliação original 50x.....	92
Figura 66 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de fadiga para o aço S355JR com redução de espessura de 64% devido ao repuxamento do disco. Ampliação original 3000x.....	93
Figura 67 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de fadiga para o aço S355JR com redução de espessura de 64% devido ao repuxamento do disco. Ampliação original 200x.....	94
Figura 68 – Curvas tensão x deformação para as amostras testadas.....	96
Figura 69 – Curvas de microdureza para as amostras testadas	99
Figura 70 – Curvas de microdureza para as amostras testadas – ênfase do início do repuxamento do disco	99
Figura 71 – Curvas de microdureza para as amostras testadas – 50% do repuxamento do disco concluído.....	100
Figura 72 – Curvas de microdureza para as amostras testadas – ênfase final do repuxamento do disco concluído	100
Figura 73 – Curvas de fadiga para as amostras testadas – Lei de Basquin (curva média)	101
Figura 74 – Curvas de fadiga para as amostras testadas – Lei de Basquin – curva de projeto R95C90	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Formas de classificação dos aços	26
Tabela 2 – Composição química aços estruturais norma DIN EN10025-2.....	27
Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos aços conforme DIN EN10025-2.....	27
Tabela 4 – Limite de redução de espessura durante repuxo de um passe (ASM Metals Handbooks, v.14. 1990).....	31
Tabela 5 – Composição química do aço estrutural de baixo carbono S355JR utilizado no processo de fabricação de discos na empresa Iochpe Maxion S/A.	45
Tabela 6 – Espessuras de repuxamento das amostras.....	46
Tabela 7 – Quantidade de corpos de prova para ensaio de tração.....	49
Tabela 8 – Quantidade de corpos de prova produzidos.....	50
Tabela 9 – Valores de K _{Owen} para vários tamanhos de amostra e repetibilidade 95% e confiabilidade 90%	53
Tabela 10 – Composição química S355JR obtida nas amostras testadas comparadas com os valores teóricos da norma DIN EN 10025-2	54
Tabela 11 – Propriedades mecânicas do aço S355JR obtidas em curva tensão x deformação para a parte plana do disco (material como recebido).....	58
Tabela 12 – Coeficiente de encruamento n e coeficiente de resistência k para a parte plana do disco (material como recebido).	58
Tabela 13 – Expoente de resistência à fadiga, b, e coeficiente de resistência à fadiga, σ'_f . Obtidos para a parte plana do disco (material como recebido)	61
Tabela 14 – Valores das curvas de vida em fadiga para as equações de Basquin (curva média) e curva de projeto R95C90 da parte plana do disco (material como recebido).....	61
Tabela 15 – Propriedades mecânicas do aço S355JR obtidas em curva tensão x deformação para a amostra com 41% de redução de espessura devido ao processo de repuxamento do disco.....	66
Tabela 16 – Coeficiente de encruamento n e coeficiente de resistência k para a amostra com 41% de redução de espessura devido ao processo de repuxamento do disco.....	67
Tabela 17 – Expoente de resistência à fadiga b, e coeficiente de resistência à fadiga σ'_f . Obtidos para o perfil repuxado do disco com 41% de redução de espessura.....	71
Tabela 18 – Valores das curvas de vida em fadiga para as equações de Basquin (curva média) e curva de projeto R95C90 do perfil repuxado do disco com 41% de redução de espessura. .	71
Tabela 19 – Propriedades mecânicas do aço S355JR obtidas em curva tensão x deformação para a amostra com 52% de redução de espessura devido ao processo de repuxamento do disco.....	77
Tabela 20 – Coeficiente de encruamento n e coeficiente de resistência k para a amostra com 52% de redução de espessura devido ao processo de repuxamento do disco.....	77
Tabela 21 – Expoente de resistência à fadiga b, e coeficiente de resistência à fadiga σ'_f . Obtidos para o perfil repuxado do disco com 52% de redução de espessura.....	81
Tabela 22 – Valores das curvas de vida em fadiga para as equações de Basquin (curva média) e curva de projeto R95C90 do perfil repuxado do disco com 52% de redução de espessura. .	82
Tabela 23 – Propriedades mecânicas do aço S355JR médias obtidas em curva tensão x deformação para a amostra com 64% de redução de espessura devido ao processo de repuxamento do disco.....	88
Tabela 24 – Coeficiente de encruamento n e coeficiente de resistência k para a amostra com 64% de redução de espessura devido ao processo de repuxamento do disco.....	88

Tabela 25 – Expoente de resistência à fadiga b , e coeficiente de resistência à fadiga, σ'_f . Obtidos para o perfil repuxado do disco com 64% de redução de espessura.	91
Tabela 26 – Valores das curvas de vida em fadiga para as equações de Basquin (curva média) e curva de projeto R95C90 do perfil repuxado do disco com 64% de redução de espessura..	92
Tabela 27 – Razão de aspecto dos grãos para as amostras testadas.....	95
Tabela 28 – Propriedades mecânicas das amostras testadas em ensaio de tração	96
Tabela 29 – Porcentagem de aumento das propriedades mecânicas das amostras repuxadas em relação a amostra da parte plana do disco.....	97
Tabela 30 – Comparativo do expoente de resistência à fadiga e coeficiente de resistência à fadiga para as amostras testadas.....	103
Tabela 31 – Valores de Tensão máxima para determinado número de ciclos para as amostras testadas de acordo com a equação de Basquin (curva média e curva de projeto R95C90) ...	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALAPA – Associação Latino Americana de Pneus e Aros

ARBL – Alta resistência e baixa liga

ASM – American Society for Metals

ASTM – American Society for Testing and Materials

b – Expoente de resistência à fadiga

CNC – Comando numérico computadorizado

CURVA SN – Curva Tensão x Número de ciclos

ETRTO – European Tyre and Rim Technical Organisation

HV – Microdureza Vickers

K – Coeficiente de Resistencia

LE – Limite de Escoamento

LR – Limite de Ruptura

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

MIB – Materials Institute of Brazil

MIG/MAG – Metal Inert Gas/Metal Active Gas

MPa – Mega Pascal

N – Coeficiente de encruamento

Nf – Número de ciclos

R – Razão de tensão

S – Tensão de amplitude

TRA – Tire and Rim Association

σ_e – Tensão de escoamento

σ_f – Tensão de resistência

σ_M – Tensão média

σ_{UTS} – Tensão última de fratura

σ_y – Tensão de escoamento

σ'_f – Coeficiente de resistência à fadiga

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	RODA E SEUS COMPONENTES	23
2.1.1	Rodas para veículos comerciais	24
2.2	AÇOS UTILIZADOS PARA FABRICAÇÃO DE RODAS.....	26
2.2.1	Aço estrutural S355JR.....	27
2.3	PROCESSO DE REPUXAMENTO DO DISCO (<i>SPINNING</i>).....	28
2.4	VIDA EM FADIGA	33
2.4.1	Definição de fadiga	33
2.4.2	Critérios de projeto.....	34
2.4.3	Vida segura.....	35
2.4.3.1	Nucleação de trincas.....	35
2.4.3.2	Curva S-N.....	36
2.4.3.3	Efeito da tensão média.....	37
2.4.4	Fadiga em rodas de veículos comerciais	39
2.5	OUTROS TRABALHOS SIMILARES	41
2.5.1	Trabalhos de extrusão por canal angular.....	41
2.5.2	Trabalhos de vida em fadiga em rodas automotivas	44
3	MATERIAL E MÉTODOS	45
3.1	MATERIAL.....	45
3.2	MÉTODOS	45
3.2.1	Obtenção dos corpos de prova	45
3.2.2	Análise Química.....	46
3.2.3	Análise Metalográfica	47
3.2.4	Microdureza Vickers	48
3.2.5	Microscopia Óptica	48
3.2.6	Ensaio de Tração	48
3.2.7	Ensaio de Fadiga	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
4.1	AMOSTRAS PARTE PLANA DISCO.....	54
4.1.1	Análise Química.....	54
4.1.2	Análise Metalográfica	54
4.1.3	Microdureza Vickers	56
4.1.4	Ensaio de Tração	57
4.1.5	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da superfície de fratura dos corpos de prova de Ensaio de Tração.....	59
4.1.6	Ensaio de Fadiga	60
4.1.7	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da superfície de fratura dos corpos de prova de Ensaio de Fadiga.....	62
4.2	AMOSTRAS PARTE REPUXADA DO DISCO – 41% DE REDUÇÃO DE ESPESSURA	63
4.2.1	Análise Metalográfica	63
4.2.2	Microdureza Vickers	65
4.2.3	Ensaio de Tração	66
4.2.4	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da superfície de fratura dos corpos de prova de Ensaio de Tração.....	68

4.2.5	Ensaio de Fadiga.....	70
4.2.6	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da superfície de fratura dos corpos de prova de Ensaio de Fadiga	71
4.3	AMOSTRAS PARTE REPUXADA DO DISCO – 52% DE REDUÇÃO DE ESPESSURA	74
4.3.1	Análise Metalográfica e Microscopia Óptica	74
4.3.2	Microdureza Vickers	76
4.3.3	Ensaio de Tração.....	76
4.3.4	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da superfície de fratura dos corpos de prova de Ensaio de Tração	78
4.3.5	Ensaio de Fadiga.....	81
4.3.6	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da superfície de fratura dos corpos de prova de Ensaio de Fadiga	82
4.4	AMOSTRAS PARTE REPUXADA DO DISCO – 64% DE REDUÇÃO DE ESPESSURA.....	84
4.4.1	Análise Metalográfica.....	84
4.4.2	Microdureza Vickers	86
4.4.3	Ensaio de Tração.....	87
4.4.4	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da superfície de fratura dos corpos de prova de Ensaio de Tração	88
4.4.5	Ensaio de Fadiga.....	90
4.4.6	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da superfície de fratura dos corpos de prova de Ensaio de Fadiga	92
4.5	COMPARATIVO DOS RESULTADOS	94
4.5.1	Análise Metalográfica.....	94
4.5.2	Ensaio de Tração	95
4.5.3	Microdureza Vickers	98
4.5.4	Ensaio de Fadiga	101
5	CONCLUSÃO	105
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	107
	REFERÊNCIAS	108

1 INTRODUÇÃO

O processo de desenvolvimento de um projeto de roda de aço para veículos comerciais tem duração aproximada de seis meses. Entretanto, devido à alta competitividade de mercado e busca pela excelência em qualidade, as empresas que atuam no ramo procuram dia após dia obter ganhos diretos e indiretos que impactem na redução de custo do produto e façam com que elas tenham algum diferencial sobre as demais também buscando a redução do prazo de desenvolvimento do mesmo.

A roda de aço é um dos elementos estruturais básicos do conjunto do pneu de um veículo a motor, é a responsável pela conexão entre o corpo do veículo e o pneu e, assim, responsável por transmitir a rotação do conjunto e movimentação do veículo. Desta forma, acaba sofrendo ação de carregamentos cíclicos, tais como forças verticais e laterais (SPONAGEL, 1988; BREUER, 2008). As rodas para veículos comerciais são consideradas itens de segurança e, por esta razão, durante o projeto de roda dá-se atenção especial à fadiga do componente com o objetivo de garantir a durabilidade do item em serviço em conjunto com a necessidade de redução de peso (BERETTA, 2003).

O componente roda possui algumas particularidades de processo que influenciam diretamente na vida em fadiga da mesma, os quais são a solda existente entre os componentes aro e disco e a influência do processo de produção do disco. Segundo Hu et al (2014), os discos para rodas automotivas necessitam de maior ductilidade do que os aros para rodas automotivas, enquanto que aços com maior resistência possuem maior potencial para redução de peso. Entretanto, buscando o uso efetivo dos materiais, é importante desenvolver os componentes aro e disco, os quais são submetidos a diferentes processos de resfriamento, com o mesmo material. Este conceito pode reduzir a dificuldade de soldagem entre os componentes, uma vez que os mesmos teriam as mesmas composições químicas.

A produção do disco, componente central da roda, ocorre por meio do processo de repuxamento (*spinning*), no qual a região central do material base até determinado diâmetro é mantido constante, sem alteração e, a partir deste diâmetro o material é submetido ao processo. Utilizando o conceito de deformação localizada, o repuxamento de tubos longos tem sido aplicado em materiais para trabalhos pesados tais como aços inoxidáveis, aços carbono, titânio, e super ligas. Embora modelos analíticos auxiliem bastante a previsão da força de repuxamento necessária, a influência de parâmetros mecânicos críticos (tais como taxa de alimentação, formato do perfil repuxado, ângulo dos

rolos e porcentagem de deformação), parâmetros metalúrgicos (composição química, limpeza da liga e estado da microestrutura) e a conformabilidade do material repuxado não são bem documentados (JAHAZI, 2000).

A Figura 1 apresenta exemplo de repuxamento do disco onde a peça de trabalho (blank) possui formato redondo e é estirada devido à pressão dos rolos de repuxamento sobre o mandril. É sabido que quando um material sofre repuxamento, que é uma operação severa de trabalho a frio, o mesmo causa efeito marcante nas suas propriedades mecânicas. Grãos bem definidos e direcionais são resultantes do repuxamento. Neste, o limite de resistência à tração e limite de escoamento aumentam enquanto que a ductilidade diminui, indicando que pode existir aumento da vida em fadiga do componente.

Figura 1 – Exemplo repuxamento de disco.

Adaptado de Wong et al. (2003).

O objetivo deste trabalho é quantificar as alterações causadas por este processo de conformação do material, avaliar sua influência na vida em fadiga do material S355JR e estabelecer o limite de redução de espessura para o material S355JR sem que haja perda das propriedades mecânicas do mesmo, contribuindo para a redução de peso do produto roda e aumento ou no mínimo manutenção da vida em fadiga do mesmo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados conceitos relacionados a roda e seus componentes, aos aços utilizados para fabricação de rodas, ao processo de repuxamento do disco (*spinning*), a vida em fadiga para o material estudado e trabalhos similares.

2.1 RODA E SEUS COMPONENTES

A roda é um elemento de revolução composto por dois componentes, aro e disco. Pode ser classificada em duas formas: roda fundida, quando os componentes são obtidos em única operação, como o caso das rodas de alumínio; ou então roda soldada, onde os componentes são produzidos separadamente. O aro pode ser produzido pelo processo de laminação, para o caso de aros para rodas sem câmara ou então pelo processo de estiramento, para o caso de aros para rodas com câmara, e o disco pelo processo de repuxamento ou estampagem do perfil.

As rodas também podem ser classificadas de acordo com a sua utilização, existem as rodas para veículos de passageiros (veículos leves), rodas para veículos comerciais (ônibus, caminhões), rodas agrícolas (tratores, colheitadeiras, pulverizadores), rodas fora de estrada (retroescavadeiras, pá carregadeiras, motoniveladoras) e rodas de motocicletas (T.R.A.12, 2011). O presente trabalho baseia-se no uso de rodas para veículos comerciais conforme explicitado na Figura 2.

O componente aro é o responsável pela montagem da roda no pneu e, por isso, possui vários tipos de perfis que são regularizados por norma, sendo as principais normas a *T.R.A. – Tire and Rim Association*, a *E.T.R.T.O. European Tire and Rim Technical Organisation* e a *ALAPA Associação Latino Americana de Pneus e Aros*, onde cada tipo de pneu possui um ou mais perfis de aro possíveis de serem utilizados devido às condições de montagem do pneu.

Figura 2 – Roda e seus componentes – (a) componente aro, (b) componente disco e em (c) componente roda.

Imagem cedida pela empresa Iochpe Maxion S/A

O componente disco é o responsável pelo encaixe e fixação da roda no eixo do veículo e não possui regulamentação para a forma do perfil, tendo como limitante a este apenas o perfil do cubo ou tambor de freio utilizado pelo veículo. A região do disco normatizada é apenas a região plana, onde está localizada a furação da roda a qual deve ser capaz de permitir montagem no eixo do veículo.

A união dos componentes aro e disco ocorre por meio do processo de soldagem, que consiste na união de dois componentes a fim de garantir a manutenção das propriedades físicas e químicas do material. Atualmente existem diversos tipos de processo de soldagem que variam de acordo com a aplicação desejada. Para o produto roda é utilizada a solda do tipo MIG/MAG TANDEM duplo arame, que consiste na combinação de duas fontes de alimentação, dois arames, duas tochas e dois arcos de solda cuidadosamente associados a fim de gerar uma solda simples.

2.1.1 Rodas para veículos comerciais

Veículos comerciais são aqueles veículos utilizados normalmente para o transporte de bens e/ou pessoas, como por exemplo, picapes, furgões, ônibus e caminhões. As rodas para veículos comerciais são classificadas de acordo com o tipo de pneu utilizado podendo ser ditas rodas para pneus com câmara ou rodas para pneus sem câmara. As rodas para pneus com câmara possuem em geral 3 componentes, o aro, o anel lateral e o disco. Por outro lado, as rodas para pneu sem câmara possuem apenas dois componentes,

geralmente, o aro e o disco, explicados anteriormente. Apesar dos componentes possuírem os mesmos nomes, estes dois tipos de roda possuem algumas diferenças entre elas, onde a principal está no perfil do aro. A Figura 3 apresenta o perfil de uma roda com câmara e de uma roda sem câmara, onde é possível visualizar a diferença entre os perfis dos aros. O presente trabalho baseia-se no estudo de uma roda com aro sem câmara.

Figura 3 – Perfil de aro sem câmara em comparação com perfil de aro com câmara.

Imagem cedida pela empresa Iochpe Maxion S/A

O processo produtivo do aro sem câmara é constituído pelo corte da chapa de aço em blanks (material base, em formato determinado, que irá originar a peça desejada), seguido das operações de enrolar o blank, soldar e posteriormente laminar a frio. O processo de laminação pode ser constituído de uma ou mais etapas.

O processo do disco, por sua vez, é constituído do corte da chapa de aço em blanks redondos, seguido da operação de repuxar os blanks (*spinning*), e então, das etapas de estampagem dos furos. A Figura 4 apresenta o perfil de um disco após repuxamento.

Após a produção dos componentes, a roda passa pelos processos de montagem e soldagem. Na montagem, o disco é posicionado no aro por meio de compressão, operação gerada em prensa e então passam para a etapa de soldagem.

Figura 4 – Perfil de roda utilizando disco com perfil repuxado (processo de *spinning*).

Imagem cedida pela empresa Iochpe Maxion S/A

2.2 AÇOS UTILIZADOS PARA FABRICAÇÃO DE RODAS

O aço é uma família de derivados de minérios ricos em ferro que são facilmente reduzidos pelo carbono para produzir ferro. Os aços são muito versáteis. Eles podem ser obtidos em formas desejadas pela deformação plástica produzida por processos tais como laminação e forjamento. Também podem ser tratados para gerar uma larga faixa de propriedades mecânicas as quais permitem que eles possam ser usados para um vasto campo de aplicações.

Os aços podem ser classificados de várias formas, como descrito na Tabela 1.

Tabela 1 – Formas de classificação dos aços

Forma de classificação	Designações
Composição	Carbono, baixa liga, aços inoxidáveis
Tipo de acabamento	Laminação a quente, laminação a frio
Forma do produto	Barra, placa, folha, tubo
Microestrutura	Ferítico, perlítico, martensítico
Nível de resistência	Como especificado nas normas ASTM
Tratamento térmico	Recozido, temperado, revenido

2.2.1 Aço estrutural S355JR

O aço S355JR é encontrado na norma DIN EN10025-2 e, diferentemente dos aços da família SAE, possui propriedades mecânicas controladas.

A Tabela 2 apresenta a composição química de alguns aços encontrados na norma DIN EN10025-2.

Os aços estruturais são usados principalmente no setor da construção, obras públicas e construções mecânicas. Estes aços mostram boa soldabilidade e conformabilidade com métodos convencionais e não são microligados. As suas características mecânicas mantêm valores aceitáveis na tenacidade.

Tabela 2 – Composição química aços estruturais norma DIN EN10025-2.

Composição (% peso)						
Grau	C	Mn	P	S	N	Si
S235JR	0.17	1.40	0.035	0.035	0.012	-
	max	max	max	max	max	-
S275JR	0.21	1.50	0.035	0.035	0.012	-
	max	Max	Max	max	max	-
S355JR	0.24	1.60	0.035	0.035	0.012	0.55
	max	max	max	Max	max	max
S355J0	0.20	1.60	0.030	0.030	0.012	0.55
	max	max	max	max	max	max

A Tabela 3 apresenta as propriedades mecânicas dos aços estruturais da norma DIN EN10025-2.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos aços conforme DIN EN10025-2

Propriedades Mecânicas			
Grau	LE (MPa)	LR (MPa)	Alongamento (%)
S235JR	235 min	360 – 510	26
S275JR	275 min	410 – 560	23
S355JR	355 min	470 - 630	20

2.3 PROCESSO DE REPUXAMENTO DO DISCO (*SPINNING*)

A tendência moderna no sentido de se utilizar estruturas cada vez maiores têm levado os engenheiros, projetistas e construtores a considerar o emprego de aços mais resistentes para evitar que essas estruturas se tornem mais pesadas (CHIAVERINI, 2005). Uma alternativa para redução de peso de estruturas e componentes de aço tem sido o emprego de aços microligados de alta resistência e baixa liga (ARBL), pois são materiais de boa conformabilidade e soldabilidade e possuem boa resistência mecânica e química (ASM, 1990). Entretanto, como já citado, o emprego destes aços no Brasil é restringido devido ao alto custo dos mesmos.

O processo de repuxamento é um dos métodos de conformação mais antigo e barato que vem ressurgindo nos últimos anos devido a algumas vantagens como a necessidade de ferramental simples e baixas cargas de conformação, além da emergente tendência das indústrias modernas pela busca de redução do peso líquido de seus componentes (WONG, 2003).

Através do processo de repuxamento obtém-se deformação plástica severa do material. Segundo Azushima et al (2008), os processos de deformações plásticas severas são definidos como aqueles nos quais uma deformação plástica intensa é imposta resultando em um aço com tamanho de grão fino. O objetivo destes processos é gerar peças mais leves utilizando metais de alta resistência para segurança e confiabilidade dos componentes.

A Figura 5 exemplifica a diferença na microestrutura de um aço de baixo carbono de limite de escoamento 330 MPa e limite de ruptura de 490MPa devido ao processo de repuxamento, onde tem-se em (a) a microestrutura inicial e em (b) a microestrutura após repuxamento a frio, conforme citado por Ounpanich et al (2007).

Figura 5 – Microestrutura de um aço de baixo de carbono. Em (a) microestrutura inicial e em (b) microestrutura após repuxamento a frio.

Adaptado de Ounpanich et al. (2007)

De acordo com Narayana e Turizuka (2008), aços com grãos finos e composições química relativamente simples têm grande potencial para o aumento da resistência mecânica. Os benefícios desta abordagem são evitar a adição de elementos de liga, evitar tratamentos térmicos adicionais, e assim, garantir a boa soldabilidade.

O processo de repuxamento (*spinning*) é um método de conformação plástica de chapas metálicas dentro de formas assimétricas sem costura através de uma combinação de rotação e força. A operação de repuxamento forçado consiste em, com o uso de um torno, pressionar uma ferramenta, haste ou rolete de compressão contra o blank (matéria-prima para o processo de repuxamento, geralmente de formato circular) que é rotacionado por um cabeçote (SORTAIS et al, 1963). Este blank será conformado e obterá formato pré-definido de acordo com as coordenadas que foram colocadas como dados de entrada para a máquina CNC responsável por controlar o caminho dos rolos (Figura 7), formando o perfil do disco. A Figura 6 exemplifica o funcionamento de um processo de repuxamento partindo-se de um blank redondo.

Blanks com comprimento de até 6m em diâmetro têm sido repuxados com sucesso. Placas de até 25mm de espessura podem ser repuxadas sem necessidade de aplicação de calor. Quando aplicado calor, blanks de até 140 mm de espessura podem ser repuxados.

Figura 6 – Exemplo do processo de repuxamento de uma platina sob um mandril.

Adaptado de ASM Metals Handbooks, v.14. (1990).

De acordo com a Figura 6, a deformação do metal é tal que o repuxamento está de acordo com a relação do seno, no qual a espessura inicial do blank está relacionada com a espessura final da parede pela equação 2.1.

$$t_2 = t_1 \cdot \sin \alpha \quad (2.1)$$

Quando o ângulo do mandril (α) é menor que 35° , a melhor prática a ser feita é utilizar mais de um passe de repuxo com diferentes ângulos de mandris para cada passo. Os perfis de disco utilizados no presente trabalho consideram apenas um passe de repuxo.

A Tabela 4 apresenta o limite em porcentagem de redução de espessura durante processo para repuxamentos realizados com apenas um passe para alguns aços e ligas de alumínio.

A Figura 7 apresenta uma máquina de repuxamento. Algumas máquinas, como a existente no processo de fabricação dos discos utilizados para geração das amostras deste trabalho possuem dois rolos de repuxamento.

Neste caso, o primeiro rolo é o rolo de repuxo grosseiro, responsável por forçar o material à inclinação e estiramento desejado e o segundo rolo, rolo de acabamento é o responsável pelo retoque final na espessura do material repuxado.

Tabela 4 – Limite de redução de espessura durante repuxo de um passe (ASM Metals Handbooks, v.14. 1990).

Liga	Redução Máxima (%)
*2014	50
*2024	50
*3000	60
*5256	50
4130	75
4340	70

* ligas de alumínio

Para as ligas de alumínio é utilizada uma porcentagem de redução de espessura menor porque materiais moles podem formar rebarbas, podendo danificar os rolos de repuxamento.

Figura 7 – Esquema de uma máquina de repuxamento

Adaptado de ASM Metals Handbooks, v.14. (1990).

A Figura 8 mostra um mandril com dois rolos de repuxamento.

A Figura 9 apresenta alguns defeitos comuns obtidos durante processo de repuxamento. Um dos mais frequentes é a flambagem ou cambamento. Visando reduzir o diâmetro final da peça repuxada para evitar perdas, faz-se necessária uma combinação de tensões compressivas tangenciais e tensões trativas radiais a serem induzidas no material. Geralmente, é possível fazê-lo utilizando-se de mais de um passe de repuxamento. No entanto, a aplicação de altas cargas de tensão em ambas as direções é indesejável para a

peça de trabalho, uma vez que pode resultar na formação de rugas ou trincas circunferenciais. Este defeito ocorre quando a face superior do blank é repuxada diversas vezes ou sofre o “*overworking*” (WONG et al., 2003).

Figura 8 – Mandril com dois rolos de repuxamento

Adaptado de ASM Metals Handbooks, v.14. (1990).

Figura 9 – Modos de falha típicos nos componentes de repuxo.

Adaptado de Wong et al. (2003).

2.4 VIDA EM FADIGA

2.4.1 Definição de fadiga

Segundo a ASTM E1823 (2013) fadiga é “o processo de mudança estrutural permanente, localizada e progressiva, que ocorre em um material sujeito a condições que produzem flutuações de tensões e esforços em algum ponto, ou pontos, e que pode culminar em trincas ou fratura completa após um número suficiente de flutuações”.

Esta falha ocorre devido ao fato de que, na superfície do elemento, existem regiões microscópicas, onde geralmente a tensão localizada torna-se muito maior do que a tensão média atuante ao longo da seção transversal do elemento. A Figura 10 representa, de forma esquemática, trincas de superfície causadas por uma tensão unidirecional, a qual leva à formação de pequenos degraus, devido ao deslizamento transversal dos grãos da microestrutura do material. Quando a tensão é cíclica, o deslizamento acontece em planos próximos, levando ao desenvolvimento de reentrâncias e saliências. Por fim, trincas de superfície são produzidas, propagando-se posteriormente para o interior da peça (POOK, 2007).

Figura 10 – Formação de uma trinca de superfície devido ao deslizamento de grãos

Fonte: (BARROS NETO, 2010).

Geralmente, são necessários três fatores para que ocorra a fadiga: (1) um valor de tensão de tração máximo suficientemente alto, (2) uma amplitude de tensão aplicada

suficientemente alta e (3) um alto número de ciclos de tensão aplicada. Além destes, existem outros fatores como concentradores de tensão, corrosão, temperatura, carregamento excessivo, estrutura metalúrgica, tensão residual e tensões combinadas que tendem a alterar as condições de fadiga (DIETER, 1981).

2.4.2 Critérios de projeto

O estudo de fadiga pode ser dividido em quatro critérios de projetos: falha segura, tolerância ao dano, vida segura ou vida infinita:

- Falha segura

Neste caso, o componente permanecerá em uso após detecção de uma trinca de comprimento não crítico e deverá propiciar um extenso período de propagação da trinca sem que haja redução na resistência residual estática. Estima-se uma vida média para a propagação da trinca (Mecânica da Fratura) cujo tamanho não comprometa a resistência estática do componente.

- Tolerância ao dano

Componente que após determinada “vida segura” deveria ser substituído, mas apresenta sobremetal suficiente para propagação estável da trinca. Neste caso são necessárias inspeções periódicas, reparos oportunos e eficientes programas de prevenção à corrosão.

- Vida segura

Neste critério, a nucleação de uma trinca implica em falha iminente, ou seja, a vida de um componente consiste na etapa de iniciação da trinca, desconsiderando a etapa de propagação, resultando na inutilização deste, antes que sua vida útil tenha sido alcançada. Este critério é aplicado em materiais de alta resistência mecânica, os quais possuem trinca crítica muito pequena e, portanto, de difícil inspeção. A vida segura é representada pela curva SN, a qual identifica, para qualquer nível de tensão, uma vida correspondente em fadiga.

- Vida infinita

Este critério refere-se a componentes que trabalham com tensões abaixo daquela pela qual o comportamento da curva S-N tende a se estabilizar à medida que a ciclagem aumenta. Para este caso, não há existência de trincas, embora todos os resultados presentes neste critério contemplam a influência de grande população de descontinuidades.

No presente trabalho, foi optado trabalhar com o conceito de vida segura, uma vez que busca-se evitar a existência de trincas no componente roda na indústria automotiva. Este conceito é bastante útil e aplicável quando as tensões e deformações existentes são na grande maioria de forma elástica.

2.4.3 Vida segura

2.4.3.1 Nucleação de trincas

A nucleação de trincas é normalmente encontrada em regiões conhecidas como bandas de deslizamentos. No entanto, as ocorrências destas não são os únicos meios de nucleação de trincas de fadiga. Segundo Stephens et al. (2001) e Lee et al. (2005), quaisquer regiões de concentração de tensões como bandas de deslizamento, inclusões, partículas de segunda fase, contornos de grãos, poros, pites de corrosão ou descontinuidades geométricas atuam como fontes de nucleação de trincas. Consequentemente, a trinca tende a iniciar no plano de cisalhamento próximo a um concentrador de tensões.

Uma vez que a trinca é nucleada, os próximos passos são os estágios de propagação (estágio I e II de crescimento da trinca). No estágio I a trinca propaga-se ao longo dos planos de cisalhamento máximos até atingir alguns diâmetros de grãos, quando então a trinca passa a se propagar na direção normal à máxima tensão de tração, estágio II ou de crescimento, até atingir a ruptura final (LEE et al., 2005).

Geralmente, as trincas de fadiga crescem de maneira transgranular. No entanto, elas podem se propagar ao longo dos contornos de grãos, dependendo das condições de carregamento, do material, da temperatura e das condições ambientais (STEPHENS et al., 2001).

2.4.3.2 Curva S-N

O comportamento de um material sob fadiga é descrito pela curva S-N (*stress v number of cycles to failure*) ou curva de Wohler. A partir das curvas S-N pode-se comparar o desempenho de diferentes materiais para diversos níveis de carga (SCHUTZ, 1996). A Figura 11 apresenta uma curva S-N genérica para um aço A e para um metal não-ferroso B.

Figura 11 – Curva S-N para um aço A e para um metal não-ferroso B.

Adaptado de Schutz, (1996).

Observa-se para a curva A da Figura 11 que, para uma determinada tensão a curva S-N tende a se estabilizar a partir de um certo número de ciclos próximo a 10⁶. Esta curva é uma curva típica para metais ferrosos (SCHUTZ, 1996). Para o caso da curva B, este comportamento não é observado.

Para determinação de uma curva S-N testa-se o primeiro corpo de prova no maior nível de tensão onde se imagina que a falha irá ocorrer a um número baixo de ciclos, aproximadamente a dois terços da tensão limite de escoamento do material. Em seguida, a tensão de teste deve ser reduzida para cada corpo de prova até que um ou mais corpos de prova não falhem a determinado número de ciclos, o qual é geralmente em torno de 1x10⁷ ciclos (CHAWLA, 2005).

2.4.3.3 Efeito da tensão média

A tensão média para um ensaio de fadiga pode ser determinada de acordo com a equação 2.2.

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})}{2} \quad (2.2)$$

Onde $\sigma_{\max}$ e $\sigma_{\min}$ são, respectivamente, a tensão máxima e a tensão mínima de ensaio.

A variação de tensão é a diferença entre a tensão máxima e a tensão mínima em um ciclo, equação 2.3:

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (2.3)$$

A tensão de amplitude é a metade da variação de tensão, equação 2.4:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (2.4)$$

A tensão média produz efeito na resistência à fadiga de um material. Na Figura 12 a tensão máxima é plotada em função da log do número de ciclos para diversos valores de razão de tensão, $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$. À medida que a razão de tensão se torna mais positiva, o qual é equivalente ao aumento da tensão média, a tensão para qual a curva S-N tende a se estabilizar se torna maior (DIETER, 1981). Os efeitos de tensões residuais também podem contar como um efeito de tensão média e a introdução de tensões de compressão em áreas críticas reduz este efeito.

Diversas equações empíricas têm sido propostas para explicar o efeito da tensão média na vida em fadiga, entretanto, três delas se destacam, a equação 2.5 representa a equação de Goodman, a equação 2.6 a equação de Gerber e a equação 2.7, a de Soderberg.

Figura 12 – Efeito da tensão média na vida em fadiga de um componente.

Adaptado de (DIETER, 1981).

Goodman e Gerber assumem uma relação entre a tensão média e a tensão última de fratura, e Soderberg, de maneira diferente, relaciona a tensão média com a tensão limite de escoamento. A Figura 13 apresenta o diagrama de Haigh, o qual relaciona as três equações citadas. Tem sido observado que os resultados práticos estão contidos entre as equações de Gerber e Goodman, onde a equação de Goodman representa uma estimativa conservadora do efeito da tensão média. É importante salientar que as três equações envolvem tensões uniaxiais, porém, na maioria dos casos reais, são encontradas ou tensões biaxiais ou triaxiais (CHAWLA, 2005).

Figura 13 – Diagrama de Haigh - comparativo equações de Goodman, Gerber e Soderberg para a tensão média de fadiga

Fonte: (ASM Metals Handbooks, v.19. 1988).

$$\sigma_a = \sigma_0 \left[1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{UTS}} \right] \quad (2.5)$$

$$\sigma_a = \sigma_0 \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{UTS}} \right)^2 \right] \quad (2.6)$$

$$\sigma_a = \sigma_0 \left[1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_Y} \right] \quad (2.7)$$

Onde σ_{UTS} é a tensão última de fratura, σ_m é a tensão média e σ_Y é tensão de escoamento.

2.4.4 Fadiga em rodas de veículos comerciais

A roda trabalha sobre um espectro de carregamento onde a amplitude e frequência do carregamento pode mudar dependendo das características do veículo, das estradas onde trafega, do pneu utilizado e, em alguns casos, das leis do país (CARVALHO, 2001). Devido à posição e função na suspensão do veículo, a roda é caracterizada como componente de segurança (BERETTA, 2003).

Em serviço, as trincas podem aparecer na roda em algumas regiões específicas, sendo elas, a região dos furos de fixação e furos de ventilação do disco, regiões de concentração de tensão devido à geometria, na região de solda aro – disco, região termicamente afetada e no raio do bead seat do aro (região do aro onde o talão do pneu é apoiado), região que sofre bastante esforço devido à geometria final da roda (CARVALHO, 2001).

Dada a importância da roda para a segurança e bom funcionamento do veículo, dois testes principais são exigidos para a determinação da capacidade de carga e comportamento em fadiga da roda, os quais são conhecidos como *dynamic radial fatigue test* e *cornering fatigue test*, ambos conforme norma “NBR6751 – *Truck wheels – Resistance and durability test*” e/ou *EUWA 3.11* e *SAE J267*.

Para o *dynamic radial fatigue test*, o conjunto pneu e roda é posicionado em contato com um flange em rotação. A carga do teste radial é aplicada no pneu gerando uma pressão de contato entre o pneu e o flange. Desta forma, o carregamento cíclico, que deve ocorrer durante serviço é simulado (KURALAY; TOPAÇ, 2012). A Figura 14 mostra a máquina para o *dynamic radial fatigue test*, neste a roda necessita alcançar 500.000 ciclos para ser aprovada.

Para o *cornering fatigue test*, a roda é presa por meio de garras de fixação na região da flange do aro sob uma placa que simula o cubo do veículo. Junto a esta placa existe um eixo bi-articulado, sob o qual é aplicada uma força a fim de gerar um momento fletor à roda. A Figura 15 apresenta a máquina para o *cornering fatigue test*. Neste a roda necessita alcançar 250.000 ciclos quando aplicado 75% da carga de teste.

Figura 14 – Máquina de teste Radial com duas cabeças de teste e esquema do teste de fadiga Radial

Imagem cedida pela empresa Iochpe Maxion S/A

Figura 15 – Máquina de teste de *Cornering* e esquema do teste de fadiga de *Cornering*

Imagem cedida pela empresa Iochpe Maxion S/A

2.5 OUTROS TRABALHOS SIMILARES

Poucos trabalhos acadêmicos foram encontrados estudando o processo de repuxamento aplicado em aços para o setor automotivo. Devido a esta dificuldade, foram utilizados nesse trabalho artigos relacionados ao processo de extrusão em canal angular o qual apresenta semelhança com o processo de repuxamento no sentido de refinamento dos grãos e melhoria das propriedades mecânicas do material. Também foram citados alguns estudos relativos à vida em fadiga em rodas de aço.

2.5.1 Trabalhos de extrusão por canal angular

A fabricação de materiais com tamanhos de grão ultrafinos tem, nas duas últimas décadas, atraído a atenção devido à possibilidade de aumento das propriedades mecânicas dos mesmos. Atualmente existem duas maneiras principais para obtenção do refinamento de grãos nos materiais: processos termomecânicos ou técnicas de deformação plástica severa.

A extrusão em canal angular é um processo de deformação plástica intensa em que o corpo de prova é forçado a passar por dois canais de seção transversal, iguais, que se interceptam formando um ângulo. Durante a extrusão o corpo de prova sofre cisalhamento na região em que os canais se interceptam. Como a área da seção transversal dos canais é igual, as dimensões do corpo de prova não se alteram e o processo pode ser repetido diversas vezes elevando-se o nível de deformação imposta pelo cisalhamento (FIGUEIREDO, 2005). Aços de baixo carbono processados por extrusão em canal angular podem atingir resistência até duas vezes maiores do que o mesmo aço processado por um tratamento térmico convencional (KIM; CHOI; CHUNG; SHIN, 2003). Conforme Dong et al. (2003), foi encontrado limite de resistência a tração de 900MPa para um aço baixo carbono com tamanho de grão de ferrita por volta de 0,2 μ m enquanto que para o mesmo aço com tamanho de grão de ferrita de 30 μ m o limite de resistência a tração é de 400 MPa.

Durante a extrusão, o corpo de prova desloca-se como um corpo rígido dentro do canal, e a deformação ocorre por cisalhamento na região de interseção entre os canais. A Figura 16 ilustra o cisalhamento que ocorre durante o processo.

Figura 16 – Princípio do processo de extrusão em canal angular

Fonte: (FIGUEIREDO, 2005).

Zrnik et al. (2006) realizaram experimentos com um aço baixo carbono (AISI 1010) extrudado em canal angular, em altas temperaturas (150°, 200° e 250°C). A microestrutura obtida pode ser visualizada na Figura 17.

A microestrutura inicial, antes da extrusão em canal angular, consiste basicamente de grãos de ferrita com um tamanho de grão de aproximadamente 50 μ m, como observado na Figura 17 (a). Como resultado do processo de extrusão em canal angular a 150°C, Zrnik et al. (2006) constataram que houve deformação severa da microestrutura inicial para o aço AISI 1010 onde foram observados grãos de ferrita alongados, Figura 17 (b), com presença de células de discordâncias e contornos de subgrãos que foram observados em análises de MEV.

Figura 17 – Microestrutura do material AISI1010 (aço baixo carbono). (a) Antes da extrusão em canal angular. (b) Após extrusão em canal angular a 150°C

Fonte: (ZRNÍK et al., 2006).

Dong et al. (2003) também realizaram experimentos com um aço de baixo carbono consistindo de 0,15%C, 0,25%Si e 1,1%Mn sendo processado por extrusão em canal angular, comparando 1, 2, 3 e 4 passes do material na matriz de canal angular. A microestrutura inicial do material utilizado possuía aproximadamente 85% em volume de ferrita com tamanho de grão de cerca de 30μm como observado na Figura 18(a).

Figura 18 – Microestrutura do material 0,15%C, 0,25%Si, 1,1%Mn (aço baixo carbono). (a) Antes da extrusão em canal angular, (b) com 1 passe de extrusão em canal angular e (c) com 3 passes de extrusão em canal angular

Adaptado de (DONG et al., 2003).

Dong et al. (2003) concluíram que foram obtidos no trabalho citado tamanho de grão de 0,2-0,3μm para o aço de baixo carbono com grãos alongados e de microestrutura

ferrítica com presença de perlita devido à severa deformação plástica causada pelo processo de extrusão por canal angular.

2.5.2 Trabalhos de vida em fadiga em rodas automotivas

Beretta et al (2003) realizaram trabalho sobre a vida em fadiga de rodas de caminhão a fim de mensurar o efeito dos defeitos do componente roda na durabilidade do componente. O estudo foi motivado pela existência de falhas prematuras em certo lote de rodas de caminhão.

O material utilizado nos componentes aro e disco foi o Fe430D o qual possui tensão de escoamento 320,0MPa e tensão limite de resistência de 450MPa, propriedades mecânicas pouco inferiores às do material utilizado neste trabalho.

Duas séries de amostras foram ensaiadas em fadiga com razão de tensão $R = 0,1$ e a partir destas foi obtida a curva S-N. Os resultados obtidos apresentaram tensão máxima de aproximadamente 260MPa para 6.10^5 ciclos.

Beretta et al (2003) concluíram que foram caracterizados os comportamentos de fadiga e propagação de trincas para o material estudado e também foi avaliado o efeito da inserção de defeitos na vida em fadiga do componente.

Moraes Filho (2007) realizou trabalho sobre a análise estrutural e verificação da vida a fadiga de uma roda automotiva utilizando o método dos elementos finitos. Neste, busco a análise estrutural e a verificação da vida a fadiga de uma roda visando a redução de massa.

O material utilizado nos componentes aro e disco foi o SAE1015AA com tensão de escoamento de 190MPa e tensão limite de resistência de 340MPa.

Como resultado, observou que o material testado apresentou vida em fadiga de 120MPa para 1.10^6 ciclos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 MATERIAL

O material estudado neste trabalho é considerado um aço de baixo carbono, com estrutura perlita + ferrita e foi produzido pelo processo de laminação a quente. O material em questão foi referenciado no texto dessa dissertação como S355JR, conforme norma DIN EN10025-2. Este material foi cedido pela empresa Iochpe Maxion S/A e sua composição química conforme norma é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Composição química do aço estrutural de baixo carbono S355JR utilizado no processo de fabricação de discos na empresa Iochpe Maxion S/A.

Composição (% peso)						
Material	C	Mn	P	S	N	Si
Especificado em norma	0.24	1.60	0.045	0.045	0.009	0.55
DIN EN10025-2	max	max	max	Max	max	max

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Obtenção dos corpos de prova

Foram cortados, por meio do processo de corte a plasma, 3 blank do aço S355JR, sendo: 1 blank com diâmetro de 500 mm, 1 blank com diâmetro de 522 mm e 1 blank com diâmetro de 546 mm. Posteriormente, os blanks foram processados pela operação de repuxamento nas condições descritas na Tabela 6. A Figura 19 mostra, de modo esquemático, o blank inicial (a), disco após processo de repuxamento (b) e corte transversal do disco repuxado mostrando de onde foram obtidos os corpos de prova (c).

Figura 19 – Esquema de obtenção dos corpos de prova. Em (a) o blank originado para repuxamento do disco, em (b) o perfil do disco repuxado e em (c) o corte da seção transversal de (b) representando a área útil para preparação dos corpos de prova.

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 6 – Espessuras de repuxamento das amostras.

Diâmetro do blank (mm)	Espessura do blank (mm)	Espessura final repuxada (mm)	Redução de espessura (%)
500	13,5	5,0	64
522	13,5	6,5	52
546	13,5	8,0	41

Após o processo de repuxamento, os discos foram usinados a fim de confeccionar os corpos de prova para as análises metalográfica, microdureza Vickers, ensaios de fadiga (levantamento de curvas S-N) e ensaios de tração.

3.2.2 Análise Química

Foi realizada análise química das amostras utilizadas por meio do aparelho espectrômetro de emissão ótica Spectro, modelo SpectroMAX, situado no laboratório físico da empresa Iochpe Maxion S/A. As análises foram realizadas de acordo com a norma ASTM A751 para a espectrometria de emissão óptica por centelha.

3.2.3 Análise Metalográfica

Foram embutidos 12 corpos de prova para análise metalográfica com aproximadamente 13 mm de largura, 13 mm de comprimento e 5 mm de profundidade, retirados da seção transversal da parte repuxada do disco, conforme Figuras 20 e 21.

Figura 20 – Esquema de obtenção dos corpos de prova para análise metalográfica e de microdureza Vickers

Fonte: Elaborada pelo autor

Em seguida, as amostras foram lixadas e polidas conforme norma ASTM E-250. Foi utilizada sequência de lixas de 150, 220, 320, 400, 600, 1200 e 2000 mesh. Após lixamento, as amostras foram polidas em politriz Arotec Aropol-S, que se encontra no laboratório químico da empresa Iochpe Maxion S/A, utilizando-se solução de alumina de 0,5 μ m e 0,3 μ m sendo o álcool utilizado como meio refrigerante. Para revelar a microestrutura das amostras foi realizado ataque químico com reagente Nital 3% utilizando-se 50 mL de álcool etílico comercial e 1,5 mL de ácido nítrico (Merk). A duração do ataque químico variou 10 a 30s, dependendo da amostra. Após ataque químico as amostras foram lavadas com água corrente, posteriormente com álcool etílico comercial e em seguida submetidas à secagem com jato de ar frio.

Figura 21 – Corpos de prova para análise metalográfica obtidos a partir da área útil do repuxamento como mostrado na Figura 19(c).

Fonte: Elaborada pelo autor

3.2.4 Microdureza Vickers

Foi realizado o ensaio de microdureza Vickers por meio de microidentação nas amostras conforme norma ASTM E-470 em microdurômetro Shimadzu HMV-2T situado no laboratório físico da empresa Iochpe Maxion S/A. Foi realizado mapeamento de microdureza para todas as amostras, considerando quarenta medições, sendo quatro linhas de medições com 10 pontos cada, onde os valores foram plotados com o auxílio do software ®Origin.

3.2.5 Microscopia Óptica

Após ataque as amostras foram caracterizadas utilizando-se microscópio óptico Leica DM IRM com câmera digital Samsung SCC 131, o qual se encontra no laboratório Físico da empresa Iochpe Maxion S/A.

3.2.6 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados pela empresa MIB – *Materials Institute of Brazil* situada na cidade de São Carlos, SP, de acordo com as especificações da norma ASTM E8-09, sendo realizados na máquina Instron 2382 com capacidade de 100 kN. Os

ensaios foram realizados com controle de deslocamento, 0,5mm/min até o limite de escoamento do material e a 2,5mm/min até a fratura e a temperatura ambiente. Foram confeccionados 12 corpos de prova, sendo 3 corpos de prova para cada condição testada. A Tabela 7 especifica as condições testadas e o número de corpos de prova extraídos.

Tabela 7 – Quantidade de corpos de prova para ensaio de tração

Diâmetro blank (mm)	Espessura blank (mm)	Espessura final repuxamento (mm)	Redução de espessura (%)	Região do disco	Quantidade de CP's
500	13,5	-	0	Parte plana	3
500	13,5	5,9	64	Parte repuxada	3
522	13,5	6,5	52	Parte repuxada	3
546	13,5	8,0	41	Parte repuxada	3

Os corpos de prova produzidos foram do tipo “*subsize specimen*” conforme Figura 22 e foram obtidos da parte repuxada do disco e da parte plana conforme Figura 23.

Figura 22 – Corpos de prova do tipo “*subsize specimen*” conforme norma ASTM E 8-09.

Fonte: Elaborada pelo autor

Após ensaios de tração foram obtidas as curvas de tensão x deformação para estes materiais conforme norma ASTM E08, onde foi optado pelo método do off-set (0,2%) para determinação da tensão limite de escoamento. Além disso, foram medidas as reduções de área para as amostras testadas, também conforme norma ASTM E08. Por fim, foram obtidos os coeficientes de encruamento, n e o de resistência, K para a equação de Hollomon das curvas geradas conforme norma ASTM E646.

Figura 23 – Esquema para obtenção dos corpos de prova para ensaio de tração e de fadiga. Em vermelho, região onde foram cortados os corpos de prova.

Fonte: Elaborada pelo autor

3.2.7 Ensaio de Fadiga

Os ensaios de fadiga foram realizados pela empresa MIB – *Materials Institute of Brazil* situada na cidade de São Carlos, SP, sendo realizados na máquina Instron Electroplus E3000 com capacidade de 3 kN. Foram realizados ensaios de flexão alternada cantilever com frequência de 10 Hz e $R = -1,0$ a temperatura ambiente e com controle de tensão. Os ensaios foram conduzidos até a fratura. Para aqueles que não fraturaram, os ensaios foram interrompidos em 2×10^6 ciclos. Foi estabelecido como critério de interrupção do ensaio deslocamentos acima de 1mm.

Foram confeccionados aproximadamente 48 corpos de prova, sendo 12 corpos de prova para cada condição testada. Foram testados 4 níveis de tensão. A Tabela 8 especifica os casos e números de corpos de prova extraídos.

Tabela 8 – Quantidade de corpos de prova produzidos

Diâmetro blank (mm)	Espessura blank (mm)	Espessura final repuxamento (mm)	Redução de espessura (%)	Região do disco	Quantidade de CP's
500	13,5	-	0	Parte plana	12
500	13,5	5,9	64	Parte repuxada	12
522	13,5	6,5	52	Parte repuxada	12
546	13,5	8,0	41	Parte repuxada	12

Os corpos de prova utilizados foram produzidos conforme norma ASTM E-602-96 no tipo “*subsize specimen*”, tendo 70 mm de comprimento, 5mm de largura e 5mm de profundida. A Figura 24 ilustra as dimensões dos corpos de prova para ensaio de fadiga, que foram obtidos da região de repuxamento e parte plana conforme mostrado na Figura 23.

Figura 24 – Corpos de prova do tipo “subsize specimen” conforme norma ASTM E-602-96.

Fonte: Elaborada pelo autor

Os ensaios de fadiga foram realizados conforme Figura 25.

Figura 25 – Esquema do ensaio de fadiga realizado.

Fonte: Elaborada pelo autor

Após ensaios de fadiga, foram geradas as curvas S-N para as amostras testadas por meio do método da Máxima Verossimilhança a partir do software MiniTab®, o qual permite a consideração dos run-outs como pontos censurados. Neste, foram obtidos os coeficientes A e B da regressão linear gerada a partir dos logaritmos da tensão máxima e do número de ciclos para a falha. Foram geradas as curvas média e de projeto R95C90 de acordo com a equação de Basquin onde foram obtidos o expoente de resistência à fadiga b , e o coeficiente de resistência à fadiga σ'_f . A curva de projeto R95C90 define que 95% das

amostras testadas terão resultados acima da curva e que existe 90% de confiança nos resultados de fadiga obtidos. Os valores para as curvas média e de projeto (R95C90) foram obtidas a partir da equação 3.1 (equação de Basquin).

$$\sigma_a = \sigma'_f \cdot (2Nf)^b \quad (3.1)$$

A partir da equação 3.1 e da regressão linear obtida pelo software MiniTab® foi possível obter o expoente de resistência à fadiga e o coeficiente de resistência à fadiga para a curva média de fadiga, conforme equações 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5.

$$\log(2Nf) = \frac{-1}{b} \cdot \log(\sigma'_f) + \frac{1}{b} \cdot \log(\sigma_a) \quad (3.2)$$

Onde σ_a é a tensão máxima e $2Nf$ é o número de ciclos para a falha. A partir da equação 3.2 e da regressão linear, tem-se a equação 3.3.

$$X = \log(\sigma_a) \quad (3.3)$$

A partir das equações 3.4 e 3.5 obtêm-se os expoente de resistência à fadiga e coeficiente de resistência à fadiga.

$$b = \frac{1}{B} \quad (3.4)$$

$$\sigma'_f = 10^{-Ab} \quad (3.5)$$

Após obtenção da curva média de fadiga, calcula-se o erro padrão, dado pela equação 3.6.

$$S^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n [Y_i - (A + BX_i)]^2 \quad (3.6)$$

Onde n é igual ao número de testes realizados, e A e B são os coeficientes obtidos da regressão linear.

Através do Limite de Tolerância de Owen, obtido pela equação 3.7, pode-se determinar o coeficiente de resistência à fadiga para a curva de projeto R95C90. A tabela 9 apresenta os valores do parâmetro de Owen para as quantidades de testes realizados.

$$K_{Owen} = K_D \cdot R_{Owen} \quad (3.7)$$

Tabela 9 – Valores de K_{Owen} para vários tamanhos de amostra e repetibilidade 95% e confiabilidade 90%

n (amostras testadas)	C = 0,90 , R = 0,95
12	2,583
16	2,400
17	2,369

*Fonte: Williams et al. 2003

Após determinar o parâmetro de Owen, um valor de 2N_f é arbitrariado a fim de se obter a tensão máxima. Então calcula-se o logaritmo da vida na curva R95C90 para a tensão máxima encontrada por meio da equação 3.8.

$$\log(2N_f, R95C90) = \log(\sigma_a) - K_{Owen} \cdot S \quad (3.8)$$

Onde S é o desvio padrão obtido. A partir dos resultados obtidos e por meio da equação 3.9 é possível obter o coeficiente de resistência à fadiga da curva de projeto R95C90.

$$\sigma' f_{R95C90} = \frac{\sigma_a}{(2N_f, R95C90)^b} \quad (3.9)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 AMOSTRAS PARTE PLANA DISCO

4.1.1 Análise Química

O material como recebido foi submetido à análise de composição química. A Tabela 10 apresenta os resultados da composição química obtida em comparação com valores de norma.

Tabela 10 – Composição química S355JR obtida nas amostras testadas comparadas com os valores teóricos da norma DIN EN 10025-2

Composição (% peso)							
Material	C	Mn	P	S	N	Si	Al
Valores obtidos	0.09	1.05	0.014	0.003	0.006	0.073	0.037
DIN EN10025-2	0.24max	1.60max	0.035max	0.035max	0.012max	0.55max	-

Os valores de composição química obtidos foram conforme esperado e, para um aço de baixo carbono com esta composição, espera-se que a micrografia resultante seja uma matriz ferrítica com presença de perlita próxima aos contornos de grãos. A presença de alumínio no material é solicitação da empresa Iochpe Maxion S/A, onde os materiais devem ser acalmados ao alumínio a fim de beneficiar a soldagem dos materiais, uma vez que o alumínio gera camada protetora à oxidação.

4.1.2 Análise Metalográfica

A Figura 25 mostra a microestrutura formada para a amostra da parte plana do disco, região que não sofreu processo de repuxamento. Nesta, pode-se observar a presença de uma matriz ferrítica (região clara da Figura) com a presença de perlita (região escura da Figura) próximo aos contornos de grão.

A Figura 27 mostra (a microestrutura do aço S355JR) região da Figura 26 com maior com maior ampliação. Nesta, foi encontrado tamanho de grão médio de 33 μ m, medição realizada conforme norma ASTM E112-04, o que está de acordo com os estudos

realizados por Zrnik et al. 1996 e Dong et al. (2003), os quais encontraram tamanho de grão entre $30\mu\text{m}$ a $50\mu\text{m}$ para um aço baixo carbono AISI 1010 laminado à quente e para um aço baixo carbono com composição química de 0,15%pC, 0,25%pSi e 1,1%pMn normalizado a 950°C por trinta minutos e resfriado ao ar, respectivamente.

Figura 26 – Microestrutura do aço S355JR, parte plana do disco (material como recebido) de espessura 13,5mm. Ataque com reagente Nital 3%. Ampliação original 200x.

Fonte: Elaborada pelo autor

Além disso, também foi determinada a razão de aspecto dos grãos do material, conforme indicado na Figura 27. Para a amostra da parte plana do disco (como recebido) foi encontrada razão de aspecto de 1,44.

Figura 27 – Microestrutura do aço S355JR, parte plana do disco (material como recebido) de espessura 13,5mm evidenciando em A a determinação da razão de aspecto dos grãos. Ataque com reagente Nital 3%. Ampliação original 500x.

Fonte: Elaborada pelo autor

4.1.3 Microdureza Vickers

Foi obtido também mapeamento de microdureza para a amostra da parte plana do disco, conforme observado na Figura 28.

Figura 28 – Mapeamento de microdureza para a amostra de aço S355JR da parte plana do disco (material virgem)

Fonte: Elaborada pelo autor

Nesta pode-se observar que a microdureza variou entre 150 e 250HV. A quantidade de carbono presente no aço influencia as propriedades mecânicas do mesmo, quanto maior a quantidade de carbono, maior as propriedades mecânicas do aço, fato justificado pela habilidade do carbono de formar solução sólida intersticial quando em contato com o ferro. Conforme Ounpanich et al. (2007), para um aço carbono com 0,08%pC a microdureza encontrada foi de 155-167HV para a amostra do material virgem laminado à quente. Quando comparado com os valores obtidos para o S355JR, pode-se dizer que a amostra da parte plana do disco apresentou mapeamento de microdureza conforme esperado devido à quantidade de carbono presente na sua composição química.

4.1.4 Ensaio de Tração

Foram levantadas 3 curvas tensão x deformação para a região da parte plana do disco, obtidas com os ensaios de tração realizados, para as amostras de aço S355JR. Uma curva tensão x deformação representativa dos ensaios pode ser observada na Figura 29 e as propriedades mecânicas médias obtidas são apresentadas na Tabela 11.

Figura 29 – Curva tensão x deformação representativa para o aço S355JR parte plana do disco (material como recebido).

Fonte: Elaborada pelo autor

A curva tensão x deformação da Figura 29 apresentou escoamento descontínuo que ocorre devido à interação de pequenas quantidades de impurezas substitucionais ou

intersticiais, como por exemplo, átomos de C e N que atuam como barreira para a movimentação das discordâncias (atmosfera de Cottrell) (DIETER, 1981). Os valores de limite de escoamento superior são em torno de 10% maiores que os valores do limite de escoamento inferior.

Tabela 11 – Propriedades mecânicas do aço S355JR obtidas em curva tensão x deformação para a parte plana do disco (material como recebido).

	Tensão LE (MPa)	Tensão LR (MPa)	Redução de Área (%)	Alongamento (%)
Parte plana	389,6	486,4	63,5	32,8

Os valores obtidos para a tensão limite de escoamento e tensão limite de resistência para a parte plana do disco (material como recebido) estão conforme especificado em norma DIN EN 10025-2 para o aço S355JR que possui tensão limite de escoamento de 355MPa mínimo e tensão limite de escoamento ente 470 e 630MPa.

Após obtenção da curva tensão x deformação para as amostras testadas, foi gerada a curva de encruamento a fim de determinar o coeficiente de encruamento para as amostras como descrito na norma ASTM- E646, onde foram obtidos os valores descritos na Tabela 12.

Tabela 12 – Coeficiente de encruamento n e coeficiente de resistência k para a parte plana do disco (material como recebido).

Coeficiente de encruamento, n	Coeficiente de resistência, K (MPa)
0,1494	748,94

A equação usada para cálculo do coeficiente de encruamento de um material é a lei da força simples ($\sigma = K\epsilon^n$), mais conhecida como equação de Hollomon. Valores típicos para o coeficiente de encruamento de aços baixo carbono estão entre 0,1 e 0,6 (DIETER, 1981). Conforme apresentado na Tabela 12, os valores obtidos para o coeficiente de encruamento e coeficiente de resistência da amostra da parte plana do disco (material como recebido) estão de acordo com a literatura. O coeficiente de encruamento avalia a capacidade do material de sofrer deformação plástica quando solicitado e pode ter influência direta no comportamento de fratura do material.

4.1.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da superfície de fratura dos corpos de prova de Ensaio de Tração

Foram avaliadas as superfícies de fratura do ensaio de tração por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), conforme Figuras 30 e 31.

Com base nas Figuras 30 e 31 pode-se dizer que a amostra da parte plana do disco (material como recebido) apresentou comportamento de fratura dúctil caracterizada pela presença de dimples. Estas cavidades observadas estão bem formadas e homogeneamente distribuídas ao longo da microestrutura. A ductilidade do material da parte plana do disco também pode ser evidenciada no gráfico de tensão x deformação onde se tem deformação de aproximadamente 35% no momento de fratura do corpo de prova. Segundo Ibrahim (2010), o micromecanismo existente durante a fratura dúctil envolve o início da trinca através da nucleação e crescimento de vazios ao redor dos carbeto e/ou inclusões e propagação da trinca através da deformação plástica da matriz.

Figura 30 – Superfície de fratura do ensaio de tração para o aço S355JR material como recebido (parte plana do disco) obtido por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Ampliação original 50x.

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 31 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de tração para o aço S355JR parte plana do disco (material como recebido) evidenciando a presença de dimples. Comportamento de fratura dúctil. Ampliação original 2500x.

Fonte: Elaborada pelo autor

4.1.6 Ensaio de Fadiga

As curvas S-N (*stress x number of cycles*) referentes à parte plana do material foram obtidas através de 16 ensaios, considerando 4 níveis de tensão, sendo 4 ensaios para cada nível. Os resultados estão dispostos no gráfico da Figura 32, de onde se obteve o nível de tensão máxima de fadiga de 250-325 MPa para $2 \cdot 10^6$ ciclos (run-out).

No gráfico da Figura 32 pode-se observar a curva média (em azul) e o intervalo de repetibilidade 95% e confiança 90% (curva laranja). Foram interrompidos 3 ensaios sem aparecimento de trincas com ciclagem de $2 \cdot 10^6$ ciclos o qual havia sido previamente determinado como run-out.

Figura 32 – Curva de Fadiga S-N obtida em ensaio de fadiga para o aço S355JR parte plana do disco (material como recebido).

Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela 13 apresenta os fatores obtidos para a equação de Basquin e a Tabela 14 os resultados obtidos em teste e também encontrados por meio da equação de Basquin para determinadas ciclagens.

Tabela 13 – Expoente de resistência à fadiga, b , e coeficiente de resistência à fadiga, σ'_f . Obtidos para a parte plana do disco (material como recebido)

	Expoente de resistência à fadiga, b	Coeficiente de resistência à fadiga, σ'_f
Curva média	-0,124	1780,08
R95C90	-0,124	1579,74

Tabela 14 – Valores das curvas de vida em fadiga para as equações de Basquin (curva média) e curva de projeto R95C90 da parte plana do disco (material como recebido)

Tensão Máxima (MPa)	Número de ciclos		
	10.000	100.000	1.000.000
Curva média	568,05	426,95	320,89
R95C90	504,12	378,89	284,78

4.1.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da superfície de fratura dos corpos de prova de Ensaio de Fadiga

A Figura 33 corresponde a amostra testada com tensão máxima de 400 MPa e que fraturou com 153.089 ciclos. Observa-se a presença de estrias de fadiga e também de marcas de deformação dispersas na matriz.

Figura 33 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de fadiga para o aço S355JR parte plana do disco (material como recebido). Ampliação original 1800x.

Fonte: Elaborada pelo autor

Conforme Luo et al. (2012), a propagação de trincas de fadiga ocorre principalmente pelas estrias de fadiga.

4.2 AMOSTRAS PARTE REPUXADA DO DISCO – 41% DE REDUÇÃO DE ESPESSURA

4.2.1 Análise Metalográfica

A Figura 34 mostra a microestrutura formada para o aço S355JR com 41% de redução de espessura devido ao repuxamento do material. Nesta, assim como nas Figuras 26 e 27, pode-se observar a presença de uma matriz ferrítica (região clara da Figura) com a presença de perlita (região escura da Figura) próximo aos contornos de grão.

Diferentemente do obtido nas amostras da parte plana do disco (material como recebido) os grãos mostrados na Figura 34 e que podem ser melhor observados na Figura 35, foram alongados por deformação plástica devido ao estiramento causado pelo repuxamento do disco. Os grãos tiveram seu comprimento aumentado no sentido do repuxamento e, conseqüentemente, alteração da razão de aspecto.

Figura 34 - Microestrutura do aço S355JR região repuxada do disco com 41% de redução de espessura em relação à parte plana. Ataque com reagente Nital 3%. Ampliação original 200x.

Fonte: Elaborada pelo autor

O processo de repuxamento do disco com 41% de redução de espessura gerou aumento da razão de aspecto nos grãos do material, foi observada razão de aspecto de 4,71.

Quando comparados com a razão de aspecto das amostras da parte plana do disco, pode-se dizer que houve um aumento aproximado de 3 vezes na razão de aspecto dos grãos. Espera-se que haja uma pequena diferença entre o alongamento dos grãos na superfície superior do material em relação à superfície inferior, uma vez que o repuxamento ocorre apenas na parte superior do material, região em contato com os rolos da máquina de repuxamento.

Figura 35 - Microestrutura do aço S355JR região repuxada do disco com 41% de redução de espessura em relação à parte plana. Ataque com reagente Nital 3%. Ampliação original 500x.

Fonte: Elaborada pelo autor

Através da análise micrográfica via MEV, pode-se observar, na Figura 36, o mesmo comportamento de grãos alongados tanto de ferrita como de perlita (localizada próximo aos contornos de grão da matriz ferrítica).

Figura 36 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do aço S355JR região repuxada do disco com 41% de redução de espessura em relação à parte plana. Ataque com reagente Nital 3%. Ampliação original 2500x.

Fonte: Elaborada pelo autor

4.2.2 Microdureza Vickers

Foi levantado o mapeamento da microdureza Vickers para a amostra do perfil repuxado do disco com 41% de redução de espessura, conforme observado na Figura 37.

Na Figura 37, observa-se também que a microdureza variou entre 250 e 350HV. Ounpanich et al. (2009) realizaram estudo com um aço de baixa liga JIS SAPH400 onde foi obtida microdureza de aproximadamente 300HV para a superfície repuxada e aproximadamente 280HV para o centro da amostra. Era esperado que houvesse aumento na microdureza da amostra em relação à parte plana do disco devido a deformação plástica gerada no processo de repuxamento, que aumenta a densidade de discordâncias nas amostras e também devido ao possível aumento da quantidade de perlita na amostra que pode ter ocorrido pelo aumento de temperatura durante processo de repuxamento, o qual pode alcançar até 100°C o que induziria a formação de perlita conforme diagrama de fases do Fe-C para uma quantidade de 0,24%pC.

Figura 37 – Mapeamento da microdureza da região repuxada do disco com 41% de redução de espessura em relação à parte plana.

Fonte: Elaborada pelo autor

4.2.3 Ensaio de Tração

Foram levantadas 3 curvas tensão x deformação para a região com 41% de redução de espessura devido ao repuxamento do disco, obtidas com os ensaios de tração realizados para as amostras de aço S355JR. Uma curva tensão x deformação representativa pode ser observada na Figura 38 e as propriedades mecânicas médias obtidas são apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 – Propriedades mecânicas do aço S355JR obtidas em curva tensão x deformação para a amostra com 41% de redução de espessura devido ao processo de repuxamento do disco

	Tensão LE (MPa)	Tensão LR (MPa)	Redução de Área (%)	Alongamento (%)
41% de redução de espessura	665,6	694,2	45,7	16,7

Para a curva tensão x deformação do perfil de disco repuxado com 41% de redução de espessura, observa-se que não houve escoamento descontínuo, como havia sido observado na Figura 29 para a curva tensão x deformação da parte plana do disco (material como recebido).

Figura 38 – Curvas tensão x deformação para o aço S355JR com redução de espessura de 41% (8,0mm) devido ao processo de repuxamento do disco

Fonte: Elaborada pelo autor

Segundo Park et al (2002), uma das diferentes características dos materiais refinados durante o ensaio de tração comparado aos materiais de grãos grosseiros é que ocorre um pequeno encruamento até a fratura, porém este ainda apresenta ductilidade moderada. Este comportamento é explicado em termos da recuperação dinâmica associada ao balanço entre a taxa de formação de discordâncias e a taxa de difusão das discordâncias presas nos contornos de grãos. A Tabela 16 apresenta o coeficiente de encruamento e coeficiente de resistência obtidos para a amostra com 41% de redução de espessura devido ao repuxamento.

Tabela 16 – Coeficiente de encruamento n e coeficiente de resistência k para a amostra com 41% de redução de espessura devido ao processo de repuxamento do disco

Coeficiente de Encruamento, n	Coeficiente de Resistência, K (MPa)
0,0534	893,54

Além disso, a curva da Figura 38 apresenta uma região de queda acentuada da tensão após formação do empescoçamento, por volta de 12 a 13% de deformação. Este fato pode estar relacionado ao aparecimento de uma fissura no corpo de prova ensaiado, como pode ser visualizado na Figura 39.

Comparando os valores da tabela 16, nota-se que houve redução do coeficiente de encruamento e aumento do coeficiente de resistência para a amostra repuxada em relação ao material da parte plana do disco (conforme recebido). Baseado nestes resultados, pode-

se dizer que a amostra com 41% de redução de espessura possui maior restrição à deformação plástica do que a amostra da parte plana do disco.

4.2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da superfície de fratura dos corpos de prova de Ensaio de Tração

As superfícies de fratura do ensaio de tração foram avaliadas por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), conforme Figuras 39 a 41.

A Figura 39 apresenta a região fraturada do corpo de prova do ensaio de tração para a amostra com 41% de redução de espessura. A Figura 40 apresenta imagem da região A na Figura 39, região próxima a uma das fissuras observadas. As fissuras mostradas na Figura 39 ocorreram de forma paralela ao carregamento aplicado durante ensaio de tração. Este tipo de comportamento sugere a ocorrência do fenômeno de delaminação durante ensaio de tração. Acredita-se que a ocorrência da delaminação está relacionada a uma tensão perpendicular à tensão principal, que atua no processo de fratura, favorecendo a clivagem de grãos grosseiros ou a fratura de coesão de interfaces fracas na matriz metálica (THAULOW, 1986).

Na Figura 40 são observadas regiões de facetas de clivagem próximas à fissura do corpo de prova (região C) o que caracteriza o comportamento frágil da amostra repuxada com 41% de redução de espessura. Entretanto, também pode-se observar regiões ao longo da região fraturada com presença de dimples (região B), que são mecanismos de fratura dúctil, caracterizando então a amostra repuxada como tendo fratura mista, ou seja, regiões com características de fratura frágil e regiões com características de fratura dúctil. A Figura 41 mostra estas cavidades alongadas e com menor profundidade que as observadas na Figura 31, o que reforça o aparecimento de fragilidade da amostra repuxada, fato observado na figura 38, pela redução da deformação do corpo de prova até a fratura e na tabela 16 com a redução do coeficiente de encruamento e aumento do coeficiente de resistência ao encruamento. Masayuki (2012) comparou em seu trabalho diferentes níveis de deformação plástica para um mesmo material e seus resultados mostraram que o material com maior grau de deformação plástica apresentou fratura mista com presença de facetas de clivagem.

Figura 39 – Superfície de fratura do ensaio de tração para o aço S355JR perfil do disco com 41% de redução de espessura devido ao repuxamento. Imagem obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Ampliação original 50x.

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 40 – Superfície de fratura do ensaio de tração para o aço S355JR perfil do disco com 41% de redução de espessura devido ao repuxamento. Evidenciando região de delaminação. Região A da figura 39. Imagem obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Ampliação original 1000x.

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 41 – Superfície de fratura do ensaio de tração para o aço S355JR perfil do disco com 41% de redução de espessura devido ao repuxamento. Ênfase da região de fratura dúctil. Região B da figura 40. Imagem obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Ampliação 5000x.

Fonte: Elaborada pelo autor

4.2.5 Ensaio de Fadiga

As curvas S-N (*stress x number of cycles*) referentes ao material S355JR – perfil do disco com 41% de redução de espessura foram obtidas considerando 4 níveis de tensão, sendo 3 ensaios para cada nível. Os resultados obtidos estão dispostos na Figura 42, de onde se obteve o nível de tensão máxima em fadiga de 400-450MPa para $2 \cdot 10^6$ ciclos.

Para o ensaio da amostra com 41% de redução de espessura foram interrompidos 2 ensaios sem aparecimento de trincas com ciclagem de $2 \cdot 10^6$ ciclos o qual havia sido previamente determinado como run-out. A Tabela 17 apresenta os fatores obtidos para a equação de Basquin e a Tabela 18 os resultados obtidos em teste e também encontrados por meio da equação de Basquin para determinadas ciclagens.

Figura 42 – Curva de Fadiga S-N obtida em ensaio de fadiga para o aço S355JR com redução de espessura de 41% devido ao repuxamento do disco.

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 17 – Expoente de resistência à fadiga b , e coeficiente de resistência à fadiga σ'_f . Obtidos para o perfil repuxado do disco com 41% de redução de espessura.

	Expoente de resistência à fadiga, b	Coeficiente de Resistência à Fadiga, σ'_f
Curva média	-0,1161	2306,78
R95C90	-0,1161	2077,88

Tabela 18 – Valores das curvas de vida em fadiga para as equações de Basquin (curva média) e curva de projeto R95C90 do perfil repuxado do disco com 41% de redução de espessura.

Tensão Máxima (MPa)	Número de ciclos	
	100.000	1.000.000
Curva média	606,21	464,03
R95C90	546,06	417,99

4.2.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da superfície de fratura dos corpos de prova de Ensaio de Fadiga

As Figuras 43 a 45 correspondem à amostra com 41% de redução de espessura testada com tensão máxima de 600 MPa e que fraturou com 133.524 ciclos. A região F da Figura 43 corresponde à área de destacamento do corpo de prova, o qual teve que ser feito

de forma manual (forçado após o teste), pois não houve fratura total do corpo de prova durante ensaio.

Figura 43 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de fadiga para o aço S355JR com redução de espessura de 41% devido ao repuxamento do disco. Ampliação original 50x.

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 43 apresenta a fratura ocorrida no ensaio de fadiga da amostra do perfil do disco com redução de espessura de 41%. Nesta pode-se ver que a fratura ocorreu em três partes da amostra, sendo duas delas na parte superior e uma maior e contínua na parte inferior, isto é, a trinca ocorreu da superfície para o interior da amostra. Tal fato pode ser observado pelas formação de múltiplas trincas representadas pelas regiões A, B, C, D, E e G na Figura 43.

A Figura 44 corresponde à região A da Figura 43 e nela é possível observar marcas de deformação intensa concentradas em determinada região da amostra, o que pode indicar que há deformações locais com magnitudes diferentes ao longo da amostra devido ao estiramento do material, o que pode causar maior fragilidade do mesmo.

Figura 44 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de fadiga para o perfil do disco com redução de espessura de 41% devido ao repuxamento do disco. Região A da Figura 43. Ampliação original 600x.

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 45 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de fadiga para o perfil do disco com redução de espessura de 41% devido ao repuxamento do disco. Ampliação original 1700x.

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 45 corresponde à região B da Figura 43 e nesta é possível observar a presença de uma inclusão (região A) de onde ocorre o início de trincas secundárias. Também é possível observar outras trincas secundárias, região B da Figura 45 ao longo da região analisada. Na região de início de trincas, a superfície de fratura mostra trincas secundárias e cavidades. Estas cavidades devem ser originárias de vazios formados por partículas de segunda fase ou contornos de grão (GOOD; BROWN, 1979).

4.3 AMOSTRAS PARTE REPUXADA DO DISCO – 52% DE REDUÇÃO DE ESPESSURA

4.3.1 Análise Metalográfica e Microscopia Óptica

A Figura 46 mostra a microestrutura formada para o aço S355JR com 52% de redução de espessura devido ao repuxamento do material. Nesta, assim como nas Figuras 30 e 31, pode-se observar a presença de uma matriz ferrítica (região clara da Figura) com a presença de perlita (região escura da Figura) próximo aos contornos de grão, onde é possível visualizar a influência do processo de repuxamento na microestrutura do material.

A Figura 47 evidencia o alongamento dos grãos como resultado da alta taxa de deformação plástica ocorrida devido ao processo de repuxamento. Foi encontrada razão de aspecto de 7,42 para a amostra com 52% de redução de espessura. Quando comparado com a parte plana do disco (como recebido) houve aumento aproximado de 5,2x na razão de aspecto, enfatizando o efeito do estiramento causando pelo processo de repuxamento do disco. A região A da figura 47 apresenta referência para o cálculo de razão de aspecto realizado.

Figura 46 - Microestrutura do aço S355JR da região repuxada do disco com 52% de redução de espessura em relação à parte plana. Ataque com reagente Nital 3%. Ampliação original 200x.

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 47 - Microestrutura do aço S355JR da região repuxada do disco com 52% de redução de espessura em relação à parte plana. Ataque com reagente Nital 3%. Ampliação original 500x.

Fonte: Elaborada pelo autor

4.3.2 Microdureza Vickers

Foi obtido também mapeamento de microdureza para a amostra com 52% de redução de espessura em relação à parte plana do disco, conforme observado na Figura 48. Nesta pode-se observar que a microdureza variou entre 230 e 380HV.

Conforme citado anteriormente, era esperado que houvesse aumento da microdureza para a amostra com redução de espessura de 52% devido ao processo de repuxamento, uma vez que há maior deformação plástica para esta condição do que para a condição com 41% de redução de espessura.

Ounpanich et al. (2007) afirmaram em seu trabalho que as amostras após repuxamento a frio apresentaram maior microdureza do que as amostras laminadas, além disso, também observaram que houve pequena variação da microdureza ao longo da profundidade da superfície da amostra, assim como observado para os resultados obtidos neste trabalho.

Figura 48 – Mapeamento da microdureza para o aço S355JR região repuxada do disco com 52% de redução de espessura em relação à parte plana.

Fonte: Elaborada pelo autor

4.3.3 Ensaio de Tração

Foram levantadas 3 curvas tensão x deformação para a região com 52% de redução de espessura devido ao repuxamento do disco, obtidas com os ensaios de tração realizados,

para as amostras de aço S355JR. Uma curva tensão x deformação representativa pode ser observada na Figura 49 e as propriedades mecânicas médias obtidas são apresentadas na Tabela 19.

Figura 49 – Curvas tensão x deformação para o aço S355JR com redução de espessura de 52% (6.5mm) devido ao processo de repuxamento do disco

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 19 – Propriedades mecânicas do aço S355JR obtidas em curva tensão x deformação para a amostra com 52% de redução de espessura devido ao processo de repuxamento do disco

	Tensão LE (MPa)	Tensão LR (MPa)	Redução de Área (%)	Alongamento (%)
52% de redução de espessura	666,1	709,7	47,8	14,1

A Tabela 20 apresenta os valores de coeficiente de encruamento e coeficiente de resistência para a amostra com 52% de redução de espessura.

Tabela 20 – Coeficiente de encruamento n e coeficiente de resistência k para a amostra com 52% de redução de espessura devido ao processo de repuxamento do disco

Coeficiente de encruamento, n	Coeficiente de resistência, K (MPa)
0,0634	953,67

A partir da Tabela 19 pode-se observar que não houve variação significativa das propriedades mecânicas da amostra com 41% de redução de espessura em comparação

com a amostra com 52% de redução de espessura, mesmo sendo observada variação de aproximadamente 1,6x na razão de aspecto de uma para outra.

A Tabela 20 mostra que houve redução do coeficiente de encruamento da amostra com 52% de redução de espessura em relação a amostra da parte plana do disco (material como recebido), o que era esperado devido à alta taxa de deformação plástica a que o material foi inicialmente submetido a fim de se obter 52% de redução de espessura. Assim como para a amostra com 41% de redução de espessura, pode-se dizer que existe maior restrição para a deformação plástica para esta amostra em comparação com a amostra da parte plana do disco (material como recebido).

Assim como para a amostra com 41% de redução de espessura, a amostra com 52% de redução de espessura não apresentou escoamento descontínuo, fato justificado anteriormente. Além disso, pode ser observada queda abrupta do nível de tensão quando a deformação do corpo de prova estava entre 10 e 11%, fato comentado posteriormente baseado nas imagens de MEV da superfície fraturada.

4.3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da superfície de fratura dos corpos de prova de Ensaio de Tração

As Figuras 50 a 52 apresentam a Microscopia Eletrônica de Varredura para as superfícies de fratura do ensaio de tração.

A Figura 50, assim como a Figura 39, apresenta fissura paralela ao carregamento aplicado, caracterizando a ocorrência do fenômeno de delaminação também para a amostra com 52% de redução de espessura. Nesta, o número de fissuras paralelas ao carregamento aplicado durante ensaio é maior do que para a amostra com 41% de redução de espessura. O aparecimento destas fissuras também pode estar relacionado à queda abrupta de tensão ocorrida na curva tensão x deformação da Figura 49.

Figura 50 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de tração para o aço S355JR com redução de espessura de 52% devido ao repuxamento do disco. Ampliação original 50x.

Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 52 é possível observar aspectos de fratura dúctil devido à presença de dimples, entretanto, estes possuem dimples alongados no sentido paralelo à superfície observada (Região B), demonstrando que os mesmos não possuem grande profundidade, o que contribui para o efeito observado na Figura 49, onde a deformação observada até a fratura do corpo de prova foi de aproximadamente 11%, enquanto que o corpo de prova da parte plana do disco apresentou deformação de aproximadamente 35%. Além disso, na Figura 51 são visualizadas facetas de clivagem próximas à fissura do corpo de prova (região A) o que caracterizam o comportamento frágil da amostra repuxada com 52% de redução de espessura, assim como ocorrido na amostra com 41% de redução de espessura. Desta forma, pode-se dizer que a amostra com 52% de redução de espessura também apresenta comportamento de fratura mista, tendo regiões de fratura frágil e regiões de fratura dúctil.

Figura 51 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de tração para o aço S355JR material com redução de espessura de 52% devido ao repuxamento do disco evidenciando comportamento de fratura dúctil – frágil. Região A da Figura 50. Ampliação original 1000x.

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 52 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de tração para o aço S355JR material com redução de espessura de 52% devido ao repuxamento do disco evidenciando comportamento dúctil. Ampliação original 2500x.

Fonte: Elaborada pelo autor

4.3.5 Ensaio de Fadiga

As curvas S-N (*stress x number of cycles*) referentes ao material S355JR – perfil do disco com 52% de redução de espessura estão dispostas na figura 53, de onde se obteve o nível de tensão máxima em fadiga de 400-450MPa para $2 \cdot 10^6$ ciclos.

A Figura 53 mostra a curva SN obtida para a amostra com 52% de redução de espessura devido ao repuxo do disco por meio da qual foram obtidos os dados da Tabela 21 e da Tabela 22.

Figura 53 – Curva de Fadiga S-N obtida em ensaio de fadiga para o aço S355JR com redução de espessura de 52% devido ao repuxamento do disco.

Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela 21 apresenta os expoentes de resistência à fadiga e o coeficiente de resistência à fadiga obtidos para a amostra com 52% de redução de espessura. Pode-se observar que o valor do expoente de resistência à fadiga para esta é muito próximo do obtido para a amostra com 41% de redução de espessura que é -0,1161, o mesmo ocorreu para o coeficiente de resistência à fadiga, σ'_f .

Tabela 21 – Expoente de resistência à fadiga b , e coeficiente de resistência à fadiga σ'_f . Obtidos para o perfil repuxado do disco com 52% de redução de espessura.

	Expoente de resistência à fadiga, b	Coeficiente de Resistência à Fadiga, σ'_f
Curva média	-0,1153	2289,97
R95C90	-0,1153	2020,77

Tal fato pode ser observado na Tabela 22, que apresenta os valores de tensão máxima para determinados ciclos de vida, onde a tensão máxima para as amostras com 41% e 52% de redução de espessura são similares.

Tabela 22 – Valores das curvas de vida em fadiga para as equações de Basquin (curva média) e curva de projeto R95C90 do perfil repuxado do disco com 52% de redução de espessura.

Tensão Máxima (MPa)	Número de ciclos	
	100.000	1.000.000
Curva média	606,29	464,91
R95C90	535,72	410,79

4.3.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da superfície de fratura dos corpos de prova de Ensaio de Fadiga

As Figuras 54 a 56 apresentam a superfície de fratura do ensaio de fadiga para a amostra testada a 600 MPa e que apresentou trinca com 135.661 ciclos.

Figura 54 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de fadiga para o aço S355JR com redução de espessura de 52% devido ao repuxamento do disco. Ampliação original 50x.

Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 54 é possível observar a presença de duas regiões com múltiplas trincas, sendo uma na parte superior da imagem (Região A) e outra, na parte inferior (Região B), também é possível visualizar região em que houve destacamento do corpo de prova de forma manual (Região C), uma vez que o corpo de prova não apresentou fratura total durante ensaio, assim como na amostra com 41% de redução de espessura. Ainda na Figura 54 são observadas marcas de deformação, entretanto, com menor intensidade do que na amostra com 41% de redução de espessura. Estas marcas podem ser visualizadas na Figura 55 onde também podem ser visualizadas algumas cavidades que podem ser resultado do destacamento de grãos (Região D), conforme também observado por Luo et al (2012) em trabalho realizado com aço de alta resistência com 0,15%pC e tensão de escoamento 536MPa e tensão limite de resistência 563MPa.

Figura 55 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de fadiga para o aço S355JR com redução de espessura de 52% devido ao repuxamento do disco. Ampliação original 1900x.

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 56 enfatiza a presença de trincas secundárias (Região E) na amostra com 52% de redução de espessura.

Figura 56 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de fadiga para o aço S355JR com redução de espessura de 52% devido ao repuxamento do disco. Ampliação original 1800x.

Fonte: Elaborada pelo autor

4.4 AMOSTRAS PARTE REPUXADA DO DISCO – 64% DE REDUÇÃO DE ESPESSURA

4.4.1 Análise Metalográfica

A Figura 58 mostra com ênfase a microestrutura formada para o aço S355JR com 64% de redução de espessura devido ao repuxamento do material. Na Figura 58 e Figura 57, pode-se observar que a maior taxa de repuxamento das amostras causou o maior alongamento dos grãos, conforme esperado. Pode-se observar a presença de uma matriz ferrítica (região clara) com a presença de perlita (região escura) próximo aos contornos de grão, assim como para todas as amostras anteriores.

Figura 57 - Microestrutura do aço S355JR da região repuxada do disco com 64% de redução de espessura em relação à parte plana. Ataque reagente Nital 3%. Ampliação original 200x.

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 58 - Microestrutura do aço S355JR da região repuxada do disco com 64% de redução de espessura em relação à parte plana. Ataque reagente Nital 3%. Ampliação original 500x.

Fonte: Elaborada pelo autor

A razão de aspecto determinada para a amostra com 64% de redução de espessura foi de 10,97 (Região A da Figura 58). Como esperado, houve aumento da razão de aspecto

devido ao maior grau de deformação plástica gerada com o processo de repuxamento do disco. A amostra com 64% de redução de espessura teve aumento aproximado de 7,6x em relação a amostra da parte plana do disco (material conforme recebido).

4.4.2 Microdureza Vickers

Foi obtido também mapeamento da microdureza para a amostra da parte plana do disco, conforme observado na Figura 59.

Figura 59 – Mapeamento da microdureza para o aço S355JR região repuxada do disco com 64% de redução de espessura em relação à parte plana.

Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 59 pode-se observar que a microdureza variou entre 250 e 350HV. Observou-se uma pequena redução na microdureza da amostra com 64% de redução de espessura se comparada com a amostra de 52% de redução de espessura, fato que pode representar o início da redução das propriedades mecânicas do material repuxado. Além disso, assim como para as outras amostras, houve variação mínima da microdureza ao longo da profundidade da superfície da amostra (eixo y).

4.4.3 Ensaio de Tração

Foram levantadas 3 curvas tensão x deformação para a região com 64% de redução de espessura devido ao repuxamento do disco, obtidas com os ensaios de tração realizados, para as amostras de aço S355JR. Uma curva tensão x deformação representativa pode ser observada na Figura 60 e as propriedades mecânicas médias obtidas são apresentadas na Tabela 23.

Figura 60 – Curvas tensão x deformação para o aço S355JR com redução de espessura de 64% devido ao processo de repuxamento do disco.

Fonte: Elaborada pelo autor

De acordo com a Tabela 23, a tensão limite de escoamento obtida foi de 618 MPa e a tensão limite de resistência de 721 MPa. Nota-se que houve um aumento na variação da tensão limite de escoamento e da tensão limite de resistência para a amostra com 64% de redução de espessura do que para as demais amostras, o que deve resultar em alteração do coeficiente de encruamento e de resistência como observado na tabela 24. Além disso, houve redução da tensão limite de escoamento do material se comparado com as amostras com 41% e 52% de redução de espessura, o que pode indicar início da perda das propriedades mecânicas com o repuxamento excessivo do material.

Tabela 23 – Propriedades mecânicas do aço S355JR médias obtidas em curva tensão x deformação para a amostra com 64% de redução de espessura devido ao processo de repuxamento do disco

	Tensão LE (MPa)	Tensão LR (MPa)	Redução de Área (%)	Alongamento (%)
64% de redução de espessura	618,1	721	40,62	14,5

A Tabela 24 mostra o coeficiente de encruamento e o coeficiente de resistência ao encruamento para a amostra com 64% de redução de espessura. Nota-se que houve redução do coeficiente de encruamento da amostra com 64% de redução de espessura quando comparado com a amostra da parte plana do disco, assim como observado para as demais amostras do material repuxado. Isto significa que após o repuxamento realizada houve redução na capacidade de deformação plástica do material.

Tabela 24 – Coeficiente de encruamento n e coeficiente de resistência k para a amostra com 64% de redução de espessura devido ao processo de repuxamento do disco

Coeficiente de encruamento, n	Coeficiente de resistência, K (MPa)
0,0679	963,52

4.4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da superfície de fratura dos corpos de prova de Ensaio de Tração

Foram avaliadas as superfícies de fratura do ensaio de tração por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), conforme Figuras 61 a 63.

A Figura 61 mostra a presença de fissuras de modo paralelo à aplicação de carga para o teste, assim como para as demais amostras repuxadas, o que indica que a amostra com 64% de redução de espessura também apresentou fenômeno de delaminação. Na Figura 62, referente à Região A da Figura 61, é possível observar maior presença de facetas de clivagem próximas à fissura e também de cavidades menores e mais alongadas (Região B da Figura 61) no sentido transversal à aplicação de carga no ensaio de tração. Esta pode ser observada na Figura 63. Desta forma, pode-se dizer que a amostra repuxada apresentou comportamento de fratura mista, tendo regiões de fratura dúctil e regiões de fratura frágil. Além disso, assim como para as outras amostras repuxadas, pode-se atribuir

degrau observado na curva tensão x deformação da Figura 60, ocorrido em torno de 13% de deformação ao aparecimento das fissuras observadas na Figura 61.

Figura 61 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de tração para o aço S355JR com redução de espessura de 64% devido ao repuxamento do disco. Ampliação original 50x.

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 62 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de tração para o aço S355JR material com redução de espessura de 64% devido ao repuxamento do disco. Região A da Figura 61. Ampliação original 2500x.

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 63 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de tração para o aço S355JR material com redução de espessura de 64% devido ao repuxamento do disco. Região B da Figura 61. Ampliação original 2500x.

Fonte: Elaborada pelo autor

4.4.5 Ensaio de Fadiga

As curvas S-N (*stress x number of cycles*) referentes ao material S355JR – perfil do disco com 64% de redução de espessura estão dispostas na figura 64, de onde se obteve o nível de tensão máxima de 450MPa para $2 \cdot 10^6$ ciclos.

A Figura 64 mostra a curva S-N obtida para a amostra com 64% de redução de espessura devido ao repuxo do disco por meio da qual foram obtidos os dados das Tabelas 25 e 26.

Figura 64 – Curva de Fadiga S-N obtida em ensaio de fadiga para o aço S355JR com redução de espessura de 64% devido ao repuxamento do disco.

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 25 – Expoente de resistência à fadiga b , e coeficiente de resistência à fadiga, σ'_f . Obtidos para o perfil repuxado do disco com 64% de redução de espessura.

	Expoente de resistência à fadiga, b	Coeficiente de Resistência à Fadiga, σ'_f
Curva média	-0,0873	1672,14
R95C90	-0,0873	1550,85

A Tabela 25 apresenta o expoente de resistência à fadiga e o coeficiente de resistência à fadiga obtidos para a amostra com 64% de redução de espessura. Pode-se observar que o valor do expoente de resistência à fadiga reduziu em relação a amostra da parte plana do disco (material conforme recebido) o que significa que a tensão máxima reduz menos para a mesma variação de ciclagem. Já para o coeficiente de resistência à fadiga foi observada uma pequena redução. O coeficiente de fadiga implica na capacidade do material suportar maior tensão máxima a uma mesma ciclagem. A Tabela 26 apresenta os valores de tensão máxima para determinados ciclos de vida. O comparativo com os valores da Tabela 14 comprovam os fatos observados.

Tabela 26 – Valores das curvas de vida em fadiga para as equações de Basquin (curva média) e curva de projeto R95C90 do perfil repuxado do disco com 64% de redução de espessura.

Tensão Máxima (MPa)	Número de ciclos	
	100.000	1.000.000
Curva média	611,95	500,50
R95C90	567,56	464,19

4.4.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da superfície de fratura dos corpos de prova de Ensaio de Fadiga

As Figuras 65 a 67 apresentam a superfície de fratura do ensaio de fadiga para a amostra testada a 580 MPa e que apresentou trinca com 137.121 ciclos.

Figura 65 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de fadiga para o aço S355JR com redução de espessura de 64% devido ao repuxamento do disco. Ampliação original 50x.

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 65 apresenta fratura do corpo de prova de fadiga onde se pode observar comportamento diferente das demais amostras. Nesta é possível visualizar 4 regiões de fissuras no centro da amostra (Região A) e também múltiplas trincas nas superfícies

superiores e inferiores da amostra (indicadas por B), no sentido em que a carga foi aplicada. As fissuras observadas podem ser decorrentes da delaminação. Segundo Francisco (2009), a ocorrência de delaminações durante o processo de fratura dúctil é consequência da ocorrência de tensões perpendiculares à direção de propagação da fratura, as quais geram restrição plástica no material à frente da trinca, isto é, tensões perpendiculares à tensão principal atuam durante o processo de dano, favorecendo a clivagem de grãos grandes ou fratura discoesa de interfaces na matriz metálica. Com isso, mais energia é necessária para o crescimento dúctil da trinca (THAULOW, 1986). Segundo Barbosa (2012), a presença de delaminação na fratura do material pode resultar no aumento da tenacidade à fratura do mesmo e, conforme Kimura et al. (2007) a delaminação atua no sentido de relaxar as tensões triaxiais na ponta da trinca, causando embotamento quando a trinca se propaga nos planos paralelos à direção de laminação.

Figura 66 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de fadiga para o aço S355JR com redução de espessura de 64% devido ao repuxamento do disco. Ampliação original 3000x.

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 66 apresenta a superfície de fratura do ensaio de fadiga, em região próxima à região A indicada Figura 65, onde é possível visualizar as trincas secundárias (indicadas por C).

Ainda na amostra com 64% de redução de espessura, nota-se na Figura 67 uma região em que pode haver existência de uma partícula em formato retangular, próxima a

uma das fissuras indicadas por A na Figura 65, porém a mesma não aparenta possuir morfologia diferente da matriz (indicada por D). Além disso, também podem ser observadas marcas de deformação ao longo da microestrutura.

Figura 67 – Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura do ensaio de fadiga para o aço S355JR com redução de espessura de 64% devido ao repuxamento do disco. Ampliação original 200x.

Fonte: Elaborada pelo autor

4.5 COMPARATIVO DOS RESULTADOS

4.5.1 Análise Metalográfica

Primeiramente, foi avaliado o aumento no comprimento dos grãos da matriz ferrítica das amostras devido aos diferentes níveis de repuxamento. Este comparativo foi realizado em função da razão de aspecto e os resultados podem ser observados na Tabela 27.

Tabela 27 – Razão de aspecto dos grãos para as amostras testadas

Amostras	Razão de aspecto
Parte Plana	1,44
41% Redução de Espessura	4,71
52% Redução de Espessura	7,42
64% Redução de Espessura	10,97

Como esperado, o repuxamento do disco gerou alongamento nos grãos da matriz ferrítica das amostras, onde houve aumento da deformação plástica e possivelmente aumento das propriedades mecânicas. Este aumento no alongamento dos grãos foi observado pela razão de aspecto calculada. O material com 64% de redução de espessura, o qual sofreu deformação plástica mais intensa apresentou aumento de razão de aspecto de aproximadamente 7,6x quando comparado com a amostra da parte plana do disco (material como recebido), aumento aproximado de 1,5x em relação a amostra repuxada com 52% de redução de espessura e aumento aproximado de 2,3x em relação a amostra repuxada com 41% de redução de espessura.

4.5.2 Ensaios de Tração

A Figura 68 apresenta o comparativo das curvas de tensão x deformação obtidas para todas as amostras.

A partir da Figura 68 é possível relacionar as propriedades mecânicas das amostras conforme Tabela 28.

Em geral, as amostras repuxadas tiveram aumento de aproximadamente 67% em média na tensão limite de escoamento e um aumento de aproximadamente 46% em média na tensão limite de resistência. O aumento das propriedades mecânicas das amostras repuxadas pode ser resultado do aumento da deformação plástica devido ao movimento e aumento da população de discordâncias, as quais atuariam como barreiras, sendo necessária maior tensão para que houvesse o movimento das mesmas.

Figura 68 – Curvas tensão x deformação para as amostras testadas

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 28 – Propriedades mecânicas das amostras testadas em ensaio de tração

Amostras	Tensão Limite Escoamento (%)	Tensão Limite Resistência (%)	σ_e/σ_f	Redução de Área (%)	Coefficiente Encruamento, n	Coefficiente Resistência, K (MPa)
Parte Plana	389,6	486,4	0,80	63,5	0,1494	748,94
41% Redução de Espessura	665,6	694,2	0,96	45,7	0,0534	893,54
52% Redução de Espessura	666,1	709,7	0,94	47,8	0,0634	953,67
64% Redução de Espessura	618,1	721	0,86	40,6	0,0679	963,52

A tabela 29 apresenta a porcentagem de aumento das propriedades mecânicas das amostras repuxadas em relação a amostra da parte plana do disco (material conforme recebido).

Tabela 29 – Porcentagem de aumento das propriedades mecânicas das amostras repuxadas em relação a amostra da parte plana do disco

Amostras	Tensão Limite de Escoamento	Tensão Limite de Resistência
	(%)	(%)
41% Redução de Espessura	70,84	42,72
52% Redução de Espessura	70,97	45,91
64% Redução de Espessura	58,65	48,23

A amostra com 64% de redução de espessura apresentou redução da tensão limite de escoamento se comparada com as tensões limite de escoamento das amostras de 41% e 52% de redução de espessura, em torno de 48MPa de diferença. Por outro lado, pôde-se observar que houve aumento da tensão limite de resistência em relação às mesmas.

Apesar do aumento das propriedades mecânicas ocorrido para as amostras repuxadas, houve também decréscimo da redução de área, o que pode ter ocorrido devido ao aumento da fragilidade do material, fato observado nas amostras de Microscopia Eletrônica de Varredura das Figuras 31, 40, 41, 51, 52, 62 e 63, onde foram observados além de dimples, facetas de clivagem, os quais caracterizam comportamento de fratura mista, ou seja, fratura com aspectos dúcteis e frágeis, enquanto que a amostra da parte plana apresentou comportamento de fratura dúctil, sendo possível a observação de dimples na superfície de fratura. Além disso, notou-se gradativo aumento da quantidade de facetas de clivagem nas amostras à medida que o nível de repuxamento do disco aumentava. Outro fato que indica a fragilização do material foi a presença do fenômeno de delaminação em todas as amostras repuxadas, o qual também foi intensificado quanto maior o nível de redução de espessura do material. O efeito de delaminação também pôde ser evidenciado pela curva tensão x deformação das amostras repuxadas, onde todas apresentaram um “degrau” de redução de tensão a uma deformação de 12 a 14%.

Conforme Tabela 28, houve redução do coeficiente de encruamento do material quando comparados a amostra da parte plana com as amostras repuxadas, fato também observado por Wang et al. (2013), onde os mesmos afirmaram que à medida que a tensão e a deformação verdadeira aumentam, a taxa de encruamento diminui gradativamente, isto é, a capacidade do material deformar plasticamente diminui. Também foi observado que houve aumento do coeficiente de resistência ao encruamento para as amostras repuxadas. O coeficiente de resistência ao encruamento implica na dificuldade do material em ser encruado.

A Figura 68 corrobora com o citado anteriormente, onde nota-se que para a amostra da parte plana do disco, houve deformação de aproximadamente 35% antes da fratura do material, enquanto que para as amostras repuxadas esta deformação variou de 10% a 15%. Kim et al. (2002) afirmaram que o material testado como recebido apresentou resultados da curva tensão x deformação típicos, tendo longo alongamento, enquanto que o material conformado a frio apresentou alta resistência e praticamente ausência de encruamento.

A Tabela 29 ainda apresenta a relação entre a tensão limite de escoamento e a tensão limite de resistência, onde se percebe aumento desta razão para as duas primeiras condições testadas e uma posterior redução para a maior faixa de redução de espessura. Ainda assim, os valores obtidos estão acima do valor para a condição inicial e, segundo Abdalla et al. (2006) os aços que apresentam esta razão inferior a 0,68 são mais eficientes em aplicações que envolvam conformação à frio devido ao grande aumento de resistência do material durante o processo de deformação.

4.5.3 Microdureza Vickers

A Figura 69 apresenta o comparativo das microdurezas obtidas para as amostras avaliadas. Nesta pode-se ver que houve aumento da microdureza para as amostras repuxadas, o que reforça o aumento das propriedades mecânicas devido ao processo de repuxamento.

As Figuras 70 a 72 mostram os gráficos obtidos para a microdureza das amostras repuxadas comparando o início, meio e final do perfil de repuxamento, onde se pode observar que no início do repuxamento ocorre aumento da microdureza do material e este é similar para todas as condições, possivelmente devido à agressividade do início do processo de repuxamento que gera o alongamento abrupto dos grãos do material. À medida que o repuxamento é feito para o restante do perfil do disco, a microdureza do material tende a se estabilizar sendo que o material que sofre maior intensidade de repuxamento apresentará maior microdureza. Para os níveis de repuxamento testados, o material com redução intermediária, 52% de redução de espessura apresentou maior microdureza, entretanto, os picos de microdureza máxima para as condições de 52% a 64% apresentaram

variação de 10HV, o que pode ser entendido como variação de medição devido à região da amostra medida.

Figura 69 – Curvas de microdureza para as amostras testadas

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 70 – Curvas de microdureza para as amostras testadas – ênfase do início do repuxamento do disco

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 71 – Curvas de microdureza para as amostras testadas – 50% do repuxamento do disco concluído

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 72 – Curvas de microdureza para as amostras testadas – ênfase final do repuxamento do disco concluído

Fonte: Elaborada pelo autor

Fukuda et al. (2002) mostraram que em aços de baixo carbono, onde há presença apenas de perlita e ferrita, a microdureza da perlita é maior que a da ferrita, entretanto, para ambas as regiões ocorre um aumento significativo da microdureza da amostra do material como recebida em comparação com as amostras após primeiro passe de extrusão por canal angular. Além disso, observaram que para os demais passes de extrusão por canal angular ainda ocorre aumento da microdureza, entretanto, em menor escala, onde a amostra como

recebida possui microdureza de 100 HV e 200 HV para a ferrita e perlita, respectivamente e entre 200-230 HV e 300-400 HV para os 3 passes de extrusão.

4.5.4 Ensaios de Fadiga

Por fim, foram comparadas as curvas de fadiga obtidas para as amostras testadas. As Figuras 73 a 74 apresentam os resultados obtidos para as curvas média (equação de Basquin) e curva de projeto R95C90.

Figura 73 – Curvas de fadiga para as amostras testadas – Lei de Basquin (curva média)

Fonte: Elaborada pelo autor

As Figuras 73 e 74 mostram que as amostras repuxadas apresentaram aumento aproximado na vida em fadiga de 44% para as amostras com 41% e 52% de redução de espessura e 53% para a amostra com 64% de redução de espessura em relação à amostra da parte plana do disco. Além disso, pôde-se observar que o comportamento das curvas de fadiga das amostras com 41% e 52% de redução de espessura é similar. Este fato pode ser observado na tensão máxima de fadiga encontrada para $2 \cdot 10^6$ ciclos que foi de 250-325 MPa para a amostra da parte plana, 400-450 MPa para a amostra com 41% de redução de espessura, 400-450 MPa para a amostra com 52% de redução de espessura e 450 MPa para a amostra com 64% de redução de espessura.

Na Figura 73 observa-se que as curvas para as amostras com 41% e 52% de redução de espessura apresentam vida em fadiga próxima à vida em fadiga da amostra com 64% de redução de espessura, entretanto, por volta de 3.10^5 ciclos ocorre maior distanciamento das curvas e a amostra com 64% de redução de espessura passa a ter comportamento de vida em fadiga ainda melhor que para as amostras com 41% e 52% de redução de espessura, fator que pode estar ligado aos diferentes valores de expoente de resistência à fadiga e coeficiente de resistência à fadiga encontrados para as amostras, onde foi observado um coeficiente de resistência à fadiga para a amostra com 64% de redução de espessura próximo ao aos valores obtidos para a amostra da parte plana do disco (material como recebido) enquanto que para as amostras com 41% e 52% de redução de espessura este valor foi bastante superior.

Figura 74 – Curvas de fadiga para as amostras testadas – Lei de Basquin – curva de projeto R95C90

Fonte: Elaborada pelo autor

As Tabelas 30 e 31 apresentam os resultados dos expoentes de resistência à fadiga e do coeficiente de resistência à fadiga e as tensões máximas obtidas para determinadas ciclagens de acordo com a equação de Basquin para as amostras testadas.

Tabela 30 – Comparativo do expoente de resistência à fadiga e coeficiente de resistência à fadiga para as amostras testadas

Amostra	Curva	Expoente de resistência à fadiga, b	Coeficiente de resistência à fadiga, $\sigma'f$
Parte plana	Curva média	-0,124	1780,08
	R95C90		1579,74
41% Redução de Espessura	Curva média	-0,1161	2306,78
	R95C90		2077,88
52% Redução de Espessura	Curva média	-0,1153	2289,97
	R95C90		2020,77
64% Redução de Espessura	Curva média	-0,0873	1672,14
	R95C90		1550,85

A partir da Tabela 31 pôde-se observar que houve aumento aproximado de 6% na vida em fadiga para a amostra com 64% de redução de espessura em relação às amostras com 41% e 52% de redução de espessura.

Tabela 31 – Valores de Tensão máxima para determinado número de ciclos para as amostras testadas de acordo com a equação de Basquin (curva média e curva de projeto R95C90)

Curva	Amostra	1.10 ⁵ ciclos	1.10 ⁶ ciclos
		Tensão (MPa)	Tensão (MPa)
Curva média	Parte plana	426,95	320,89
	41% Redução de Espessura	606,21	464,03
	52% Redução de Espessura	606,29	464,91
	64% Redução de Espessura	611,95	500,50
Curva R95C90	Parte plana	378,89	284,78
	41% Redução de Espessura	546,06	417,99
	52% Redução de Espessura	535,72	410,79
	64% Redução de Espessura	567,56	464,19

Para as Microscopias Eletrônicas de Varredura analisadas das amostras testadas, foi observada a presença de estrias de fadiga apenas para a amostra da parte plana do disco, como mostrado nas Figuras 33, 44, 45, 55, 56, 66 e 67. Embora a propagação de uma trinca por fadiga seja acompanhada, na maioria das vezes, pela formação de estrias, em certos casos elas não se formam, ou são extremamente difíceis de se observar (BROOKS, 1993). Além da presença de estrias, a amostra da parte plana do disco apresentou superfície

com grande quantidade de alvéolos (Figura 33), enquanto que para as amostras com 41% e 52% de redução de espessura foi observada a presença de trincas secundárias, marcas de deformação (regiões claras das Figuras 44, 45, 55 e 56), regiões com aspectos de clivagem e também múltiplas trincas. Para a amostra com 64% de redução de espessura foi observado comportamento bastante diferente das demais, onde foi observada presença de delaminação na Figura 65 e também de trincas secundárias (Figura 66). Laurito (2010) obteve resultados similares na avaliação do aço RD-480 onde classificou imagem similar à obtida na Figura 66 deste como marcas de deformações mais intensas e trincas secundárias mais evidentes.

Por fim, avaliando os resultados obtidos por meio da microscopia eletrônica de varredura das superfícies de fratura dos ensaios de tração e de fadiga, e fazendo um comparativo com os resultados apresentados nas Tabelas 28 e 30, pôde-se observar que houve redução do coeficiente de encruamento para as amostras repuxadas e também redução no expoente de resistência à fadiga, onde pode-se dizer que estes apresentam uma relação diretamente proporcional e que ambos dependem da composição do material. Além disso, estão diretamente ligados à morfologia da superfície de fratura do material, onde foi observado que a redução do coeficiente de encruamento resulta na redução da capacidade do material em se deformar plasticamente, aumentando a fragilidade do mesmo, que pôde ser observada no gráfico tensão x deformação, e também na presença de facetas de clivagem e delaminações nas amostras repuxadas.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos para o material S355JR utilizado foram:

- Através da composição química comprovou-se que o aço S355JR utilizado para as amostras atende o especificado em norma DIN EN10025-2.
- Por meio da análise metalográfica foi verificado que as fases presentes foram matriz ferrítica e perlita dispersa na matriz e nos contornos de grão com tamanho médio de grão de $33\mu\text{m}$.
- Com relação às propriedades mecânicas, o aço S355JR apresentou microdureza entre 150 e 250 HV, limite de escoamento médio de 389,6 MPa, limite de resistência médio de 486,4 MPa, coeficiente de encruamento médio de 0,1494 e redução de área média de 63,5%. O limite de resistência à fadiga observado ($2 \cdot 10^6$ ciclos) foi de 250-325 MPa.

Os resultados obtidos para as amostras repuxadas foram:

- A análise metalográfica das amostras repuxadas mostrou que houve aumento do comprimento dos grãos no sentido do repuxamento e que para a amostra com 64% de redução de espessura foi observado comprimento de grão de $67\mu\text{m}$.
- Os valores de microdureza para a amostra com 41% de redução de espessura foram de 250 a 350 HV, para a amostra com 52% de redução de espessura foram de 230 a 380 HV e, para a amostra com 64% de redução de espessura foram de 250 a 350 HV. Isto pode ser explicado pela deformação plástica causada pelo processo de repuxamento do disco.
- Através dos ensaios de tração foram obtidas as propriedades mecânicas das amostras repuxadas, a amostra com 41% de redução de espessura apresentou limite de escoamento médio de 665,6 MPa, limite de resistência médio de 694,2 MPa, coeficiente de encruamento médio 0,0534 e redução de área média de 45,7%. A amostra com 52% de redução de espessura apresentou limite de escoamento médio de 666,1 MPa, limite de resistência médio de 709,7 MPa, coeficiente de encruamento médio 0,0634 e redução de área média de 47,8%. A amostra com 64% de redução de espessura apresentou limite de escoamento médio de 618,1 MPa, limite de resistência médio de 721,0 MPa, coeficiente de encruamento médio de 0,0679 e redução de área média de 40,6%. O aumento das propriedades mecânicas devido ao processo de repuxamento e consequente deformação plástica gera aumento da fragilidade do material, entretanto, o efeito da fragilidade gerada

é menos influente nas propriedades do material do que o efeito do limite de escoamento e limite de resistência. Houve aumento de 71% no limite de escoamento para as amostras com 41% e 52% de redução de espessura e de 59% no limite de escoamento para a amostra com 64% de redução de espessura. O limite de resistência aumentou em 43% para a amostra com 41% de redução de espessura, 46% para a amostra com 52% de redução de espessura e 48% para a amostra com 64% de redução de espessura. A redução de área encontrada foi de 28% para a amostra com 41% de redução de espessura, 25% para a amostra com 52% de redução de espessura e 36% para a amostra com 64% de redução de espessura, mostrando que a amostra com maior taxa de repuxamento apresentou maior tenacidade do que as amostras com menor taxa de repuxamento.

- O ensaio de fadiga por flexão alternada permitiu obtenção dos seguintes resultados para a tensão máxima de fadiga a 2.10^6 ciclos: 400-450 MPa para a amostra com 41% de redução de espessura, 400-450 MPa para a amostra com 52% de redução de espessura e 450 MPa para a amostra com 64% de redução de espessura. Houve aumento de 44% da vida em fadiga para as amostras com 41% e 52% de redução de espessura e 53% de aumento de vida em fadiga para a amostra com 64% de redução de espessura. A amostra com 64% de redução de espessura apresentou 6% de aumento de vida em fadiga em relação às amostras com 41% e 52% de redução de espessura.

O processo de repuxamento do disco, devido à deformação plástica que é gerada, é responsável pelo aumento das propriedades mecânicas do material e, consequentemente, do componente disco, aumentando também a vida em fadiga deste componente, conforme observado para os dados do material. Além disso, pode-se dizer que o material S355JR suporta reduções de espessura maiores do que as testadas, não sendo o material o limitante para maiores reduções. Entretanto, pôde-se observar que houve aumento significativo da fragilidade do material. Os níveis de redução de espessura testados podem ser utilizados para fabricação do componente disco sem que haja comprometimento do desempenho do produto nos testes de fadiga aos quais o item roda deve ser submetido. Considerando uma roda 22.5 x 8.25 (diâmetro e largura do aro, respectivamente, em polegadas) padrão, pode-se obter redução de peso da roda de aproximadamente 5% se utilizado disco com 52% de redução de espessura em relação ao mesmo componente com 41% e, em torno de 10,5% de redução de peso da roda se utilizado disco com 64% de redução de espessura em relação ao mesmo componente com 41%.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com os resultados obtidos nesta Dissertação, são apresentadas abaixo sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar análises metalográfica, de microdureza, ensaios de tração e de fadiga e microscopia eletrônica de varredura das seções transversais dos corpos de prova testados a fim de se obter as propriedades mecânicas e razão de aspecto para estas amostras.
- Realizar análises metalográfica, de microdureza, ensaios de tração e de fadiga e microscopia eletrônica de varredura para o material S355JR com redução de espessura de 70% (espessura repuxada de 4,0mm) a fim de se obter o limite de redução de espessura para o aço S355JR com o processo de repuxamento.
- Realizar análises metalográfica, de microdureza, ensaios de tração e de fadiga e microscopia eletrônica de varredura para o material S355JR com redução de espessura de 78% (espessura repuxada de 3,0 mm) a fim de se obter o limite de redução de espessura para o aço S355JR com o processo de repuxamento.

REFERÊNCIAS

ABDALLA, A. J. et al. Otimização das propriedades mecânicas de um aço ARBL através de tratamentos térmicos. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE METALURGIA E MATERIAIS, 2006. Cuba, p.276-281.

ASM Metals Handbooks. Materials Park: ASM International, 1988. **Fatigue and Fracture**, v.19.

ASM Metals Handbooks. Materials Park: ASM International, 1988. **Forming and forging process, in forming and forging**, v.14.

ASM Metals Handbooks. Materials Park: ASM International, 1988. **Properties and selection iron steel and high performance alloys**, v.1.

AMERICAN STANDARD TECHNICAL MECHANICAL – **ASTM A751** – Standard test methods for practices, and terminology for chemical analysis of steel products. Annual Book of ASTM Standards, 1997.

AMERICAN STANDARD TECHNICAL MECHANICAL – **ASTM E08** – Standard test methods for tensile testing of metallic materials. Annual Book of ASTM Standards, 2009.

AMERICAN STANDARD TECHNICAL MECHANICAL – **ASTM E112** – Standard test methods for determining average grain size. Annual Book of ASTM Standards, 2004.

AMERICAN STANDARD TECHNICAL MECHANICAL – **ASTM E1823** – Standard terminology relating to fatigue and fracture testing. Annual Book of ASTM Standards, 2013.

AMERICAN STANDARD TECHNICAL MECHANICAL – **ASTM E466** – Standard test methods for conducting force controlled constant amplitude axial fatigue tests of metallic materials. Annual Book of ASTM Standards, 2002.

AMERICAN STANDARD TECHNICAL MECHANICAL – **ASTM E646** – Standard test methods for tensile strain-hardening exponents (n-Values) of metallic sheet materials. Annual Book of ASTM Standards, 1997.

AZUSHIMA, A., KOPP, R., KORHONEN, A., YANG, D.Y., MICARI, F., LAHOTI, G. D., GROCHE, P., YANAGIMOTO, J., TSUJI, N., ROSOCHOWSKI, A., YANAGIDA, A., MURTY. Severe plastic deformation (SPD) processes for metals. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* **57** p.716-735, 2008.

BARBOSA, L. S. **Efeito da espessura na tenacidade à fratura e no crescimento de trinca por fadiga em um aço do tipo API 5L-X70**. 2012. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto.

BARROS NETO, E. F. **Testes de fadiga de rodas veiculares – Proposta de estabelecimento, para os testes em laboratório, dos carregamentos que simulem os ocorridos no teste de durabilidade estrutural de veículo em pista**. 2010. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

BERETTA, S., CARBONI, M. FINZI A. Defects and in-service fatigue life of truck wheels. *Engineering Failure Analysis*, p. 45-57, 2003.

BROOKS, C. R.; CHOUDHURY, A. **Metallurgical failure analysis**. New York: McGraw-Hill, 1993.

BREUER, E. **Hoepke**. Nutzfahrzeugtechnik, 5. Vollständig uberarbeitete Auflage. Wiesbaden: Vieweg. Teubner GWV Fachverlage GmbH, 2008.

CARVALHO, P. C. Automotive Wheels – An approach for structural analysis and fatigue life prediction. *Revista SAE Brasil – Seção São Paulo*, p.237 – 243. 2001.

CHAWLA, K.K.; MEYERS, M.A. **Mechanical behavior of materials**. Upper Saddle River, N.J. Prentice Hall, 2005. p.463-491.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7ª ed. São Paulo. ABM, 2005.

DONG, H. S; HAN, Y.; KIM, Y. NAM, P. Spheroidization of low carbon steel processed by equal channel angular pressing. *Materials Transactions*, v.44, p. 1630-1635, 2000.

DIETER, E. G. **Metalurgia mecânica**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1981. p. 360-390.

FIGUEIREDO, R. B., **Processamento de uma liga Pb-4%Sb por extrusão angular em canais iguais**. 2005. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais.

FUKUDA, Y.; OH-ISHI, K.; HORITA, Z.; LANGDON, T.G. Processing of a low carbon steel by equal channel angular pressing. **Acta Materialia**, p. 1359-1368, 2002.

FRANCISCO, J. C. S. **Avaliação da tenacidade à fratura de aço API 5L X70 utilizado na fabricação de dutos transportadores de gás e petróleo**. 2009. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos/USP.

GOOD, S. H. BROWN, L. M. The nucleation of cavities by plastic deformation. **Acta Metallurgica**, 1979.

HU, Jung, DU, Lin-Xiu, WANG, Jian Jun, SUN, Qing Yi. Cooling process and mechanical properties design of hot-rolled low carbon high strength microalloyed steel for automotive wheel usage. **Materials and design** **53**, p.332-337. 2014

JAHAZI, M., EBRAHIMI, G. The influence of flow forming parameters and microstructure on the quality of a D6ac steel. **Journal of materials processing technology** **103**, p.362-366. 2000.

IBRAHIM, O. H. Comparison of impact properties for carbon and low alloy steels. **Journal of Materials Science and Technology**, v27, p. 931-936, 2011.

KIM, K.; CHOI, M.; CHUNG, C.; SHIN, D. Fatigue properties of ultrafine grained low carbon steel produced by equal channel angular pressing. **Materials Science and Engineering A340**, p. 243-250, 2003.

KIMURA, Y.; INOUE, T.; YIN, F.; SITDIKOV, O.; TSUZAKI, K. Toughening of a 150MPa class steel through formation of an ultrafine fibrous grain structure. **Scripta Materialia**, v.57, 2007.

KURALAY, N.; TOPAÇ, M. Fatigue life prediction of a heavy vehicle steel wheel under radial loads by using finite element analysis. **Engineering Failure Analysis**, p. 67-79, 2012.

LAURITO, D. F. **Estudo da propagação de trinca por fadiga de um aço microligado com diferentes condições microestruturais**. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, 2010.

LEE, Y. et al. Fatigue testing and analysis: theory and practice. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.

LIU, Y.; LI, Y.; LI, S.; YANG, Z.; CHE, S.; HUI, W.; WENG, Y. Prediction of the S-N curves of high strength steels in the very high cycle fatigue regime. **International Journal of Fatigue**, 2010.

LUO, Y.; HUANG, C.; GUO Y.; WANG, Q. Energy based prediction of low cycle fatigue life of high strength structural steel. **Journal of iron and steel research, international**, 19(10), p.47-53, 2012.

MASAYUKI, K. A stress based criterion for ductile crack initiation of pre strained carbon steel. **Engineering Fracture Mechanics**, v96, p. 461-479, 2012.

MORAES FILHO, L.F.L. **Análise estrutural e verificação da vida a fadiga de uma roda automotiva utilizando o método dos elementos finitos**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.

NARAYAMA, S.V.S., TORIZUKA, S. Microstructure mechanical properties correlation in ultrafine grained steels processed by large strain warm deformation”, **ISIJ International** **48**, p.1088-1095. 2008.

OUNPANICH, D.; MUTOH Y.; YOSHII K. Fatigue behavior of hot-rolled steel plate at various stages of fabrication. **Materials Science and Engineering A** **477**, p.386-394, 2007.

OUNPANICH, D., MUTOH Y., YOSHII K. Plain fatigue and fretting behavior of hot-rolled steel sheet after cold spinning. **Materials Science and Engineering A** **509**, p.14-22, 2009.

PARK, Kyung-tae, SHIN Dong Hyuk. Microstructural interpretation of negligible strain-hardening behavior of submicrometer-grained low carbon steel during tensile deformation. **Metallurgical and materials transactions** **33A**, p.705-707, 2002.

POOK, L. Metal Fatigue, **What it is, why matters**. London, UK. University College London, UK: Springer, 2007.

SCHUTZ, W. **A history of fatigue**. Engineering Fracture Mechanics, 1996.

SILVA, Mauricio de Carvalho. **Caracterização das propriedades mecânicas e metalúrgicas do aço API 5L X80 e determinação experimental de curvas J-R para**

avaliação da tenacidade a fratura. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

SORTAIS, H. C.; KOBAYASHI, S.; THOMSEN, E.G. Mechanics of Conventional Spinning, **Transactions of the ASME**, 1963.

SPONAGEL, R. J. **Reifen und rader.** Wurzburg. Vogel Buchverlag, 1988.

STEPHENS, R. I. et al. **Metal fatigue in engineering.** 2nd ed. New York: John Wiley, 2001.

THAULOW, C. et al. Fracture mechanical properties in controlled rolled CMn thermomechanically treated steels with splittings. **Engineering Fracture Mechanics.** p. 251-270, 1986.

WANG, S.; PENG, Y.; LI, Z. Work hardening and deformation mechanism of cold rolled low carbon steel. **Research Journal of Applied Sciences**, 2013.

WONG, C. C.; DEAN, T. A.; LIN, J. A review of spinning, shear forming and flow forming processes. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, p. 1419-1435, 2003.

ZRNIK J., MAMUZIC, I., DOBATKIN, S. V., STEJSKAL, Z., KRAUS, L. Low carbon steel processed by equal channel angular warm pressing. **Metalurgija** **46**, p.21-27. 2006.