

PUCRS

FACULDADE DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS  
DOUTORADO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

MARCOS WERNER

**COMPOSIÇÕES ELASTOMÉRICAS DE ALTO DESEMPENHO MECÂNICO PARA  
APLICAÇÃO EM COLHEITADEIRAS VISANDO BAIXO ÍNDICE DE QUEBRA DE GRÃOS**

Porto Alegre  
2017

PÓS-GRADUAÇÃO - *STRICTO SENSU*



Pontifícia Universidade Católica  
do Rio Grande do Sul



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

FACULDADE DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

**COMPOSIÇÕES ELASTOMÉRICAS DE ALTO DESEMPENHO  
MECÂNICO PARA APLICAÇÃO EM COLHEITADEIRAS VISANDO  
BAIXO ÍNDICE DE QUEBRA DE GRÃOS**

**MARCOS WERNER**

ENGENHEIRO DE MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA

MESTRE EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

ORIENTADOR: PROF. DR. MARCUS SEFERIN

Tese de doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia e Tecnologia de Materiais

**Porto Alegre**

**Abril, 2017**

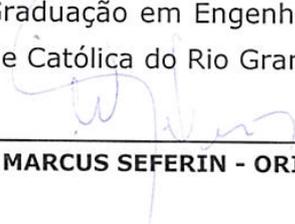


Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

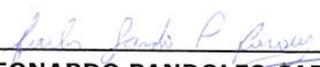
## COMPOSIÇÕES ELASTOMÉRICAS DE ALTO DESEMPENHO MECÂNICO PARA APLICAÇÃO EM COLHEITADEIRAS VISANDO BAIXO ÍNDICE DE QUEBRA DE GRÃOS

**CANDIDATO: MARCOS WERNER**

Esta Tese de Doutorado foi julgada para obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

  
\_\_\_\_\_  
**DR. MARCUS SEFERIN - ORIENTADOR**

### BANCA EXAMINADORA

  
\_\_\_\_\_  
**DR. CARLOS LEONARDO PANDOLFO CARONE - FEEVALE - UNIVERSIDADE FEEVALE**

  
\_\_\_\_\_  
**DRA. MARLY ANTONIA MALDANER JACOBI - PPGQ - UFRGS**

  
\_\_\_\_\_  
**DRA. ROSANE ANGÉLICA LIGABUE - DO PGETEMA/FENG - PUCRS**

**PUCRS**

Campus Central  
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 30 - Sala 103 - CEP: 90619-900  
Telefone: (51) 3353.4059 - Fax: (51) 3320.3625  
E-mail: engenharia.pg.materiais@pucrs.br

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”*

*Marthin Luther King*

## **DEDICATÓRIA**

À minha família sem exceção, por ter sempre me apoiado de uma maneira ou de outra, e á deus, por ter me indicado o caminho até aqui.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais e família, que se esforçaram ao máximo por mim e estão sempre ao meu lado.

A minha esposa Daiana pelo entendimento e paciência durante esta etapa em minha vida.

Ao professor Marcus Seferin pelas grandes ideias sugeridas, desafios propostos, e pela orientação.

Aos colegas da unidade do SENAI/CETEPO de São Leopoldo pelo apoio e dedicação no projeto desenvolvido, principalmente a Karin Britto, Jordão Gheller, e ao Eduardo Gerhardt, pela sempre disposição nos esclarecimentos.

À AGCO do Brasil, pela oportunidade de realizar e financiar este trabalho, como pioneiro em pesquisa e desenvolvimento na empresa.

A PUCRS, especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, pela realização do doutorado.

A CAPES, pela oportunidade da bolsa, pois sem ela não conseguiria realizar este sonho em minha vida.

## **PRODUÇÃO CIENTÍFICA**

- WERNER M.; SEFERIN, M. Caracterização de blendas elastoméricas com a adição de negro de fumo em conjunto com nanotubo de carbono. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, ABM, ISSN 2176-1523, 2016.

- WERNER M., Wearing Rubber Bar, com a reivindicação: "Wearing rubber bars built in polymeric material in a specific geometry, intended to be installed in the threshing cylinder, in combines". Solicitação de Patente encaminhada por Dannemann, Siemsen, Bigler & Ipanema Moreira, depositada no Reino Unido sob o protocolo CAN1602 em fevereiro de 2017.

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA .....</b>	<b>5</b>
<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>6</b>
<b>PRODUÇÃO CIENTÍFICA.....</b>	<b>7</b>
<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>8</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>11</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>16</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>20</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>21</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>22</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>27</b>
<b>2.1. Objetivos específicos.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2. Hipótese investigada.....</b>	<b>28</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>29</b>
<b>3.1. Sistemas de Processamento para colheita.....</b>	<b>29</b>
<b>3.2. Influências da máquina na Qualidade de Grão e Variáveis Agronômicas ..</b>	<b>33</b>
<b>3.3. Considerações, tipos de borrachas e aplicações .....</b>	<b>39</b>
<b>3.4. Problemas de abrasão de elastômeros .....</b>	<b>41</b>
<b>3.5. Fatores que podem afetar o desgaste da borracha.....</b>	<b>43</b>
3.5.1. Força sob a amostra .....	43
3.5.2. Fator Geométrico .....	44
3.5.3. Coeficiente de Atrito.....	45
3.5.4. Superfície de deslizamento.....	46
3.5.5. Velocidade de deslizamento .....	47
3.5.6. Interação da Borracha e sua Resistência a Abrasão .....	48
<b>3.6. Aditivção e modificação de matrizes para aumento de resistência dos materiais elastoméricos .....</b>	<b>49</b>
<b>3.7. Propriedades e tipos de cargas utilizadas nas borrachas.....</b>	<b>51</b>
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>59</b>
<b>4.1. Materiais utilizados para elaboração dos compósitos.....</b>	<b>59</b>
<b>4.2. Formulações e processamento.....</b>	<b>61</b>
<b>4.3. Preparação das composições.....</b>	<b>62</b>

<b>4.4. Equipamentos e Métodos .....</b>	<b>63</b>
4.4.1. Curva Reométrica .....	63
4.4.2. Cura dos corpos de prova .....	63
4.4.3. Viscosidade Mooney .....	64
4.4.4. Dureza Shore A .....	65
4.4.5. Resistência à abrasão.....	65
4.4.6. Tensão e alongamento na ruptura .....	65
4.4.7. Resistência ao rasgamento.....	65
4.4.8. Densidade aparente .....	66
4.4.9. Resistência ao envelhecimento térmico .....	66
4.4.10. Resistência ao ozônio .....	66
4.4.11. Análise Dinâmico Mecânica (DMA).....	66
4.4.12. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	67
4.4.13. Microscopia de Força Atômica (AFM) .....	67
<b>4.5. Caracterização das amostras para Implementação Computacional .....</b>	<b>67</b>
4.5.1. Ensaio de Tração Uniaxial .....	68
4.5.2. Ensaio de Compressão Uniaxial .....	68
4.5.3. Ensaio de Cisalhamento Puro.....	68
<b>4.6. Simulação Numérica Computacional .....</b>	<b>68</b>
<b>4.7. Definição e fabricação da matriz.....</b>	<b>71</b>
<b>4.8. Elaboração do lote piloto dos compostos elastoméricos selecionados.....</b>	<b>72</b>
<b>4.9. Testes de Campo para qualidade de grão da cultura.....</b>	<b>73</b>
4.9.1. Colheita de Soja.....	74
4.9.2. Colheita de Feijão .....	75
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>78</b>
<b>5.1. Resultados dos ensaios laboratoriais .....</b>	<b>78</b>
5.1.1. Características de processamento das composições .....	78
5.1.2. Viscosidade Mooney .....	79
5.1.3. Parâmetros de cura.....	80
5.1.4. Propriedades físico-mecânicas .....	81
5.1.5. Resistência ao envelhecimento térmico .....	83
5.1.6. Resistência ao ozônio .....	84
5.1.7. Resultado da Análise dinâmico-mecânica (DMA) .....	85
5.1.8. Microscopia de força atômica (AFM).....	88

<b>5.2. Resultados dos estudos de caso da simulação numérica computacional</b>	<b>90</b>
5.2.1. Estudo de Caso 1	90
5.2.2. Estudo de Caso 2	93
5.2.3. Estudo de Caso 3	97
5.2.4. Estudo de Caso 4	101
<b>5.3. Elaboração do Lote piloto</b>	<b>104</b>
5.3.1. Seleção e elaboração dos compostos (Metodologia)	104
5.3.2. Vulcanização das amostras	107
<b>5.4. Testes em campo das amostras</b>	<b>108</b>
5.4.1. Desempenho do material na colheita da cultura de soja	109
5.4.1.1. Adaptação da colheitadeira em campo para o pré-teste	109
5.4.1.2. Pré-teste das amostras	110
5.4.1.3. Coleta de grãos nas máquinas	110
5.4.1.4. Resultados de quebra de grão de soja	112
5.4.1.5. Análise dos resultados de quebra de grão	115
5.4.1.6. Análise das amostras dos compósitos pós-teste de colheita	115
5.4.2. Desempenho do material na colheita de feijão	117
5.4.2.1. Adaptação da colheitadeira em campo para o teste na cultura de feijão	117
5.4.2.2. Resultado análise técnica do grão de feijão	118
5.4.2.3. Análise Comparativa na cultura de feijão	121
5.4.2.4. Perda de massa das amostras do teste de feijão	122
<b>5.5. Caracterização de superfície pós teste de campo via MEV</b>	<b>125</b>
<b>6. CONCLUSÕES</b>	<b>130</b>
<b>7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>133</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>134</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Produtividade nacional da cultura de soja no período 2007 – 2016 segundo Conab, 2017. ....	22
Figura 1.2. Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa sobre desenvolvimento de materiais alternativos baseados em elastômeros.....	26
Figura 3.1. Vista perspectiva de uma colhedora de grãos convencional (Werner, 2013). ....	30
Figura 3.2. Sistema de trilha de uma colheitadeira Tangencial (1 – Cilindro de trilha, 2 – Côncavo de separação) (Werner, 2013). ....	31
Figura 3.3. Cilindro de trilha de uma máquina tangencial (Werner, 2013). ....	32
Figura 3.4. Dimensional padrão da barra de trilha (Werner, 2013). ....	32
Figura 3.5. Côncavo do sistema de trilha (Werner, 2013). ....	33
Figura 3.6. Influência da velocidade do cilindro de trilha sob a variedade de milho "Benicia" (Umidade 1 - 32,5% e Umidade 2 - 64,5) e "Attribut"(Umidade 1 - 18,5%, e Umidade 2 - 25,7%) (Adaptado e traduzido de PETKEVICHIOUS et al. 2008). ....	37
Figura 3.7. Efeito da umidade e tamanho de grão na força da ruptura da semente (Traduzido e adaptado de SAIEDIRAD et al. 2008). ....	38
Figura 3.8. Abrasão de borracha de butadieno e borracha natural frente ao desgaste forçado na superfície (LIANG et al.2010). ....	44
Figura 3.9. Superfícies da borracha NR desgastadas, sem formação de película a esquerda, e com formação de película a direita (Tangudom et al. 2014). ....	47
Figura 3.10. Velocidade versus taxa de desgaste em composições na matriz de SBR (Traduzido e adaptado de Saffar et al.2010). ....	48
Figura 3.11. Desgaste de EPDM com variações de carga de NF sob diferentes condições de velocidade e força aplicada (Karger et al.2008). ....	50
Figura 3.12. Desgaste da Borracha natural reforçada com Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e com diferentes agentes de acoplamento em percentuais diferentes (Fu et al.2013). ....	52

Figura 3.13. Estruturas provenientes de nanotubos de carbono: (a) folha de grafite; (b) SWCNT; (c) DWCNT; (d) MWCNT (Ribeiro, 2015).....	54
Figura 3.14. Módulos à deformação de 100%, 200% e 300% obtidos nos ensaios de tração dos compósitos extrudados em matriz de estireno-butadieno-estireno contendo teores diferentes de MWCNT e CB (NF) (Pedroni, 2009).....	55
Figura 3.15. Microscopia eletrônica de varredura ilustrando a formação/dispersão de nanotubos de carbono do tipo de parede múltiplas (Pedroni, 2009). ....	56
Figura 3.16. Análise recuperação da deformação do PU reforçado de com de TiO <sub>2</sub> (Silva et al. 2013). ....	56
Figura 3.17. Curvas de $\tan \delta$ para polibutadieno com diferentes CB, na região de transição vítrea (Robertson, 2008). ....	57
Figura 4.1. Processos de mistura utilizado em cada tipo de composição. ....	63
Figura 4.2. Modelo reduzido do perfil de borracha dimensionado como base no dimensional apresentado na Figura 3.4. ....	69
Figura 4.3. Desenho CAD da matriz desenvolvida.....	72
Figura 4.4. Detalhe da localização do caracol central dentro do armazenamento de uma colheitadeira de grãos. ....	73
Figura 5.1. Curvas reométricas dos compostos de NR (a) e blenda de NR/EPDM (b).....	81
Figura 5.2. Amostras expostas ao ozônio após 72 h de ensaio. A seta vermelha indica o sentido de laminação do composto.....	85
Figura 5.3. Modulo de armazenamento e Modulo de perda em função da temperatura.....	86
Figura 5.4. Tangente $\delta$ das amostras em função da temperatura.....	87
Figura 5.5. Análise de AFM da amostra de NR50, a esquerda imagem 2D, e a direita a imagem 3D.....	88
Figura 5.6. Análise de AFM da amostra de NR60, a esquerda imagem 2D, e a direita a imagem 3D.....	89
Figura 5.7. Análise de AFM da amostra de NR/EPDM/MWCNT, a esquerda imagem 2D, e a direita a imagem 3D.....	90

Figura 5.8. Modelo do indentador raio 25 mm atuando no sentido radial (eixo y). ....	91
Figura 5.9. Deslocamento final de 4,5 mm no eixo y para o composto NR 60 NF. ...	91
Figura 5.10. Tensões Principais Máximas no momento final para o composto NR 60 NF. ....	92
Figura 5.11. Força de reação em função do deslocamento aplicado. ....	93
Figura 5.12. Modelo do indentador raio 25 mm atuando no sentido tangencial (eixo x). ....	94
Figura 5.13. Deslocamento final no eixo x para o composto NR 60 NF. ....	94
Figura 5.14. Tensões Principais Máximas no momento final para o composto NR 60 NF. ....	95
Figura 5.15. Força de reação tangencial em função do deslocamento do indentador. ....	96
Figura 5.16. Força de reação radial em função do deslocamento do indentador. ....	96
Figura 5.17. Força de 100N distribuída em uma das faces. ....	97
Figura 5.18. Deslocamento no eixo z final para a composição de NR 60 NF. ....	98
Figura 5.19. Tensões Principais Máximas no momento final para a composição NR 60 NF. ....	98
Figura 5.20. Força de 100 N distribuída em na outra face. ....	99
Figura 5.21. Deslocamento no eixo z final para a composição NR 60 NF. ....	100
Figura 5.22. Tensões Principais Máximas no momento final para a composição NR 60 NF. ....	100
Figura 5.23. Modelo do indentador tipo grão atuando no sentido radial (eixo y). ....	101
Figura 5.24. Deslocamento final no eixo y para a composição de NR 60 NF. ....	102
Figura 5.25. Tensões principais máximas no momento final para a composição de NR 60 NF. ....	102
Figura 5.26. Força de reação em função do deslocamento aplicado. ....	103

Figura 5.27. (À esquerda) - Pré-elaborado de borracha e inserto metálico preparado com primer e adesivo antes da vulcanização/ (À Direita) - Amostras após o processo de vulcanização. ....	108
Figura 5.28. Processo de adaptação.....	109
Figura 5.29. (à esquerda) Primeira rodada de pré-teste das amostras, (à direita) Descarregamento de grãos para o início dos testes de performance. .	110
Figura 5.30. Máquina colheitadeira MF34 ano modelo 2006. ....	111
Figura 5.31. Máquina colheitadeira CR5080 ano modelo 2013.....	112
Figura 5.32. Distribuição das amostras no cilindro de trilha. ....	117
Figura 5.33. Janela de adaptação na colheitadeira a esquerda (A), e a direita(B) as amostras montadas sob o cilindro de trilha. ....	118
Figura 5.34. B - Sistema original/A – Detalhe barra de trilha metálica. ....	118
Figura 5.35. B - Sistema montado com as amostras/A – detalhe da barra de trilha elastomérica. ....	120
Figura 5.36. Colheitadeira axial utilizada no comparativo modelo MF9690 ano de fabricação 2011.....	122
Figura 5.37. Perda de massa média das amostras de NF50NF.....	124
Figura 5.38. Perda de massa média das amostras de NR60NF .....	124
Figura 5.39. Perda de massa média das amostras de NR/EPDM/MWCNT .....	125
Figura 5.40. Localização das imagens geradas pela microscopia eletrônica de varredura sobre o protótipo testado em campo.....	126
Figura 5.41. MEV da zona 1 de: a) NR60NF 500µm/ b) NR/EPDM/MWCNT 500µm / c) NR50NF 500µm/ d) NR60NF 100µm/ e) NR MWCNT 100µm / f) NR50NF 100µm .....	127
Figura 5.42. MEV da zona 2 de: a) NR60NF 500µm/ b) NR/EPDM/MWCNT 500µm / c) NR50NF 500µm/ d) NR60NF 100µm/ e) NR MWCNT 100µm / f) NR50NF 100µm .....	127

Figura 5.43. Micrografia eletrônica de varredura da zona 3 de: a) NR60NF 500 $\mu$ m/ b) NR/EPDM/MWCNT 500 $\mu$ m / c) NR50NF 500 $\mu$ m/ d) NR60NF 100 $\mu$ m/ e) NR MWCNT 100 $\mu$ m / f) NR50NF 100 $\mu$ m ..... 128

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.2. Estimativa de perdas em moeda corrente por danos em sementes no processo de colheita da cultura de soja em território nacional. ....	23
Tabela 3.1. Dano mecânico e quebra de grão durante a manipulação de grão em uma colheitadeira, indicando os efeitos do produto US (umidade da semente) e AA (ângulo de agressividade), e velocidade de rotação (RS) do caracol em danos de grão de arroz (Traduzido de Zareinfofoush et al.2010). ....	35
Tabela 3.2. Principal comparação da força de ruptura e energia da semente de cominho considerando o efeito da interação de taxa de carregamento e orientação da semente (Traduzido de Saiedirad et al.2008). ....	39
Tabela 3.3. Influência da sílica em diferentes tipos de borrachas (Traduzida de Wu et al.2013). ....	52
Tabela 4.1. Formulações das composições utilizando-se NR.....	61
Tabela 4.2. Formulações dos compostos utilizando-se blenda de NR/EPDM .....	62
Tabela 4.3. Parâmetros de cura dos corpos de prova.....	64
Tabela 5.1. Tempo e Energia consumida durante processo de mistura das composições. ....	78
Tabela 5.2. Viscosidade Mooney (C – Composto de borracha/M – Unidade Mooney/L – Tamanho rotor/1 – Tempo pré aquecimento corpo de prova/4 – Tempo que é medido o valor da viscosidade/100° - Temperatura do teste.....	79
Tabela 5.3. Parâmetros de cura dos compostos obtidos nas curvas reométricas.....	81
Tabela 5.4. Dureza, Resistência à Tração e Rasgo dos compostos avaliados .....	82
Tabela 5.5. Abrasão e densidade das composições .....	82
Tabela 5.6. Variação das propriedades físico-mecânicas antes e após envelhecimento na câmara 70°C por 70h (todos os valores apresentados abaixo são em percentuais, quando negativo, se trata do valor em porcentagem de decréscimo).....	83

Tabela 5.10. Resultado estudo de caso 1 .....	92
Tabela 5.11. Resultados do estudo de caso 2 .....	95
Tabela 5.12. Resultados estudo de caso 3 - força a direita. ....	99
Tabela 5.13. Resultados do estudo de caso 3 - força a esquerda. ....	101
Tabela 5.14. Resultados do estudo de caso 4 .....	103
Tabela 5.15. Parâmetros de processo utilizados no Banbury para os compostos NR 50 NF e NR 60 NF .....	105
Tabela 5.16. Ordem de adição no Banbury para os compostos NR 50 NF e NR 60 NF .....	105
Tabela 5.17. Parâmetros de processo utilizados no misturador Banbury para as composições MWCNT.....	106
Tabela 5.18. Ordem de adição para as composições MWCNT.....	106
Tabela 5.19. Parâmetros de processo para preparação da primeira etapa do composto NR/EPDM MWCNT.....	107
Tabela 5.20. Parâmetros de cura das amostras em formato final .....	107
Tabela 5.21. Quebra de grão colheitadeira MF6690(máquina de testes) na colheita da soja.....	113
Tabela 5.22. Quebra de grão colheitadeira MF34 .....	114
Tabela 5.23. Quebra de grão colheitadeira CR5080 .....	114
Tabela 5.24. Perda de massa nas amostras .....	116
Tabela 5.25. Resultados da qualidade de grão com o deslocamento de 3km/h, onde Côncavo Aberto Posição 17, e Côncavo Fechado posição 7.....	119
Tabela 5.26. Resultados da qualidade de grão com o deslocamento de 5km/h, onde Côncavo Aberto Posição 17, e Côncavo Fechado posição 7.....	119
Tabela 5.27. Resultados da qualidade de grão com o deslocamento de 3km/h, onde Côncavo Aberto Posição 17, e Côncavo Fechado posição 7.....	120

Tabela 5.28. Resultados da qualidade de grão com o deslocamento de 5km/h, onde  
Côncavo Aberto Posição 17, e Côncavo Fechado posição 7..... 121

Tabela 5.29. Perda de massa nas amostras oriundas da colheita de feijão ..... 123

## LISTA DE SIGLAS

MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
AFM	Microscopia de Força Atômica, (do inglês Atomic Force Microscopy)
MOG	Material além do grão, (do inglês Material Other Grain)
EPDM	Borracha de Etileno-Propileno-Dieno
CB/NF	Negro de fumo, (do Inglês Carbon Black)
NR	Borracha Natural, (do Inglês Natural Rubber)
MWCNT	Nanotubos de Carbono de parede múltiplas, (do Inglês multiple wall carbon nanotube)
SWCNT	Nanotubos de Carbono de parede simples, (do Inglês simple wall carbon nanotube)
DWCNT	Nanotubos de Carbono de parede dupla, (do Inglês double wall carbon nanotube)
SBR	Borracha de estireno butadieno, (do Inglês styrene-butadiene rubber)
GPS	Sistema de Posicionamento Global, (do Inglês Global Position System)
PHR	Partes por cem de borracha, (do inglês Parts per Hundred Rubber)

## RESUMO

WERNER, Marcos. **Composições elastoméricas de alto desempenho mecânico para aplicação em colheitadeiras visando baixo índice de quebra de grãos.** Porto Alegre. 2017. Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

Este trabalho tem por objetivo elaborar e desenvolver uma composição elastomérica apta a ser aplicada no sistema industrial de uma máquina colheitadeira de grão visando reduzir a quebra de grão (semente) e ou dano mecânico em colhedoras automotrizes através da sua capacidade de absorção de energia, gerada pelo carregamento do trilhamento de material no sistema da máquina. Foi trabalhado com matrizes de Etileno-Propileno-Dieno (EPDM) e borracha natural (NR), carregadas com sílica (S), negro de fumo (CB) e nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNT) em proporções predefinidas. A partir das composições analisadas, foram escolhidas três formulações com base nos resultados de resistência ao rasgamento, resistência à abrasão e dureza, e então elaboradas em seu formato original (geometria metálica) para testes de desempenho em campo e análises mais detalhadas do material. Os testes de campo foram elaborados em duas etapas, uma de avaliação do material em si, e outra para avaliar a performance do material em condições normais de colheita em duas culturas diferentes (feijão e soja), onde a partir do mesmo, foi mensurada qualidade da semente colhida em relação ao material proposto, e obtidas as conclusões da utilização do mesmo. Ao final do teste foi evidenciada uma melhora significativa na qualidade de grão, e percebida as diferenças nas composições nos ensaios laboratoriais, e a aplicação foi a que exigiu mais dos materiais em termos de resistência.

*Palavras Chaves: Elastômeros, Colheitadeiras, Grão*

## ABSTRACT

WERNER, Marcos. **High mechanical performance elastomeric compounds for application on harvesters, in order to achieve a lower grain breakage index.** Porto Alegre. 2017. Post-Graduate Thesis Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

This paper aims to elaborate and develop an elastomeric compound able to be used in an industrial complex system as a grain harvester machine in order to reduce the grain breakage (seed) and/or mechanical damage in self-propelled harvesters through its energy absorption capabilities, energy produced by the material loading and transportation within the machine system. The compound was developed with Ethylene-Propylene-Diene Monomer (EPDM) and natural rubber (NR), loaded with silica (S), carbon black (CB) and multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) in predefined proportions. From the evaluated compounds, three samples were chosen based on tear resistance, abrasion resistance and rubber hardness tests results, and then shaped in its original format (metallic geometry) for performance field tests and a more detailed material analysis. Field tests were done in two steps, one material assessment, and another one to assess the material performance in normal harvest conditions in two different crops (edible beans and soybeans), these tests also were used to evaluate the harvested grain quality in relation to the rubber compound used for harvesting and, therefore, the conclusions attained from the material usage. At the end of the tests, a significant improvement in grain quality was evidenced, and the differences in the compositions were noticed in the laboratory tests, and the application was the most critical to the materials in terms of resistance.

*Keywords: Elastomers, Harvesters, Grains*

## 1. INTRODUÇÃO

Em qualquer cultura agrícola, a qualidade do grão colhido não depende somente da região, da safra, da época do ano ou das etapas posteriores de beneficiamento pelas quais as sementes passam, mas também do maquinário usado na colheita. A perda com a quebra de grãos representa de 1,7% a 14,5% na colheita, tendo de ser minimizada para aumentar a eficiência do processo (Marcondes et al. 2010). Para Hanna et al. (2007), danos ao revestimento da semente ou dano interno ao grão é mais difícil de se avaliar rapidamente, mas é particularmente importante para alguns clientes, como por exemplo, a indústria de sementes e processadores de grau alimentício.

O crescimento da agricultura, junto com a evolução tecnológica das culturas de plantio, vem se destacando muito nos últimos anos. A figura 1.1 apresenta a evolução da produtividade da cultura de soja no Brasil. A previsão é de dobrar a produtividade das lavouras em curto espaço de 10 anos.

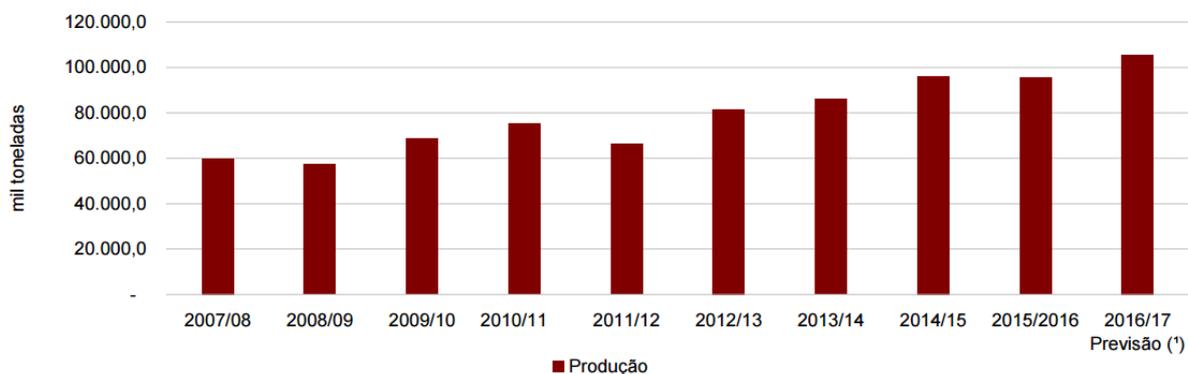


Figura 1.1. Produtividade nacional da cultura de soja no período 2007 – 2016 segundo Conab, 2017.

Já em um âmbito mundial, temos uma perspectiva da safra de soja de aproximadamente 337 milhões de toneladas, expressivamente mais alto que o último ano, considerando a estimativa para a safra 2016/2017, como apresenta na tabela 1.1.

Tabela 1.1. Produção global da cultura de soja, em milhões de toneladas ( Adaptado de Conab, 2017).

<i>País/Safra</i>	<i>2015/16 (a)</i>	<i>2016/17 DEZ(b)</i>	<i>2016/17 JAN(c)</i>
Estados Unidos	106,86	118,69	117,21
Brasil	96,5	102	104
Argentina	56,8	57	57
China	11,79	12,5	12,9
Outros	41,59	47,82	46,74
<b>Total</b>	<b>313,53</b>	<b>338</b>	<b>337,85</b>

Valor real do período 2015/16;(b) Estimativa do período em dezembro de 2016; (c) Estimativa do período em janeiro de 2017.

Considerando um simples cálculo levando em consideração a estimativa de colheita somente de soja nacional, e considerando as perdas mínimas por qualidade de grão (1,7% segundo Marcondes et al. 2010), pode-se estimar que 1,7 bilhões de reais serão perdidos na próxima safra por danos às sementes associados ao processo de colheita mecanizada, conforme ilustrado na tabela 1.2.

Tabela 1.2. Estimativa de perdas em moeda corrente por danos em sementes no processo de colheita da cultura de soja em território nacional.

Produção nacional de soja (Brasil 2016/2017)	104,00	Milhões de Toneladas
Utilização de colheitadeiras para colheita 85%	88,40	Milhões de Toneladas
Valor médio de perdas por dano Mecânico 1,7%	1,49	Milhões de Toneladas
<b>Total de valor fora de circulação por qualidade de grão</b>	<b>1,73</b>	<b>Bilhões de Reais*/**</b>

\*Considerado 1 saco de soja igual a 60 kg;\*\*Considerando o valor de 1 saco de soja igual a R\$ 70,00

Cabe salientar que o valor demonstrado acima está somente considera o âmbito nacional, e uma monocultura. Porém no Brasil se faz o cultivo em média de até três plantios anuais segundo Conab (2017), e também foi considerado o mínimo de dano mecânico (1,7%), sendo que esse valor pode chegar a 14,5%.

A quebra dos grãos em colheita, ocorre quando esses passam entre o cilindro de trilha e o côncavo do sistema industrial nas colheitadeiras, onde é provocado intencionalmente um impacto nas sementes para que as mesmas sejam separadas dos demais materiais que fazem parte da planta (palha, vagem, espiga, folhas, etc.).

Tanto o cilindro de trilha como o côncavo são feitos de aço, material de alta dureza que, aliado ao atrito e rotação, debulham a vagem/espiga e, em muitos casos, danificam a semente (Marcondes et al. 2010). As barras estriadas são os elementos que entram em contato direto com o grão. Por isso, a substituição ou recobrimento do aço por outro material de menor dureza como, por exemplo, materiais baseados em elastômeros ou compósitos poderiam minimizar o problema de quebra das sementes. Para Lorandi (2016) os compósitos e nanocompósitos vem sendo estudados e desenvolvidos com o principal objetivo de melhoria de desempenho de peças de engenharia, seja por diminuir o peso final do produto ou por melhorar propriedades específicas.

A simples aplicação de elastômeros no sistema industrial poderia trazer vantagens devido à capacidade de amortecimento de energia que estes materiais demonstram. No entanto essa solução tende a ocasionar um segundo problema no que tange a durabilidade do artefato, exigindo assim estudos mais aprofundados e detalhados para solucionar ou minimizar este inconveniente.

A aplicação de borrachas em peças de engenharia exige seu processamento, que usualmente parte da mistura de polímero e aditivos formando a composição. Cargas são normalmente usadas para reforçar o polímero, conferindo maior módulo, melhorando na resistência ao rasgo, resistência à ruptura e abrasão, por exemplo. Plastificantes, geralmente óleos, melhoram o processamento da borracha e afetam

sua dureza. Outros componentes também são incorporados ao composto, como agentes de proteção, agentes para melhorar a mistura e pigmentos. Todos os componentes da formulação do composto são misturados sob alto cisalhamento a fim de conferir ótima dispersão dos mesmos (Baranwal, 2010).

De acordo com a aplicação do material, seleciona-se o elastômero base da formulação, bem como a natureza da carga, o teor, e a natureza do plastificante, o sistema de cura e os agentes de proteção. Para recobrir ou substituir as barras metálicas estriadas do cilindro de trilha, deve-se selecionar um material com menor dureza do que o aço; boa resistência ao rasgo e à sua propagação, visto que há constante solicitação do provável material na colheita; boa resistência à abrasão, uma vez que o cilindro rotaciona e atrita o côncavo e as vagens/espigas e grãos; boa resistência a intempéries, por ser utilizado em ambiente externo, com exposição à luz e calor e boa adesão ao metal, no caso de recobrir as barras de aço.

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de sistemas baseados em borrachas reforçadas com diferentes cargas para avaliar a viabilidade de seu emprego no cilindro de trilha de colheitadeiras e procurar relações entre composição e desempenho dos materiais elastoméricos formulados. Considerando as condições de uso do cilindro de trilha com materiais a base de borracha, optou-se por avaliar Borracha Natural (NR) e etileno-propileno-dieno (EPDM) por apresentarem as principais propriedades desejáveis (capacidade de absorção de energia e resistência abrasão) para a aplicação deste produto, desde que adequadamente formulados.

Este trabalho está estruturado em 5 etapas:

- ✓ Etapa 1: Pesquisa bibliográfica, desenvolvimento e formulações de compostos de borracha;

Esta etapa está contemplando a seguinte metodologia de desenvolvimento com base na raiz do problema (Figura 1.2):

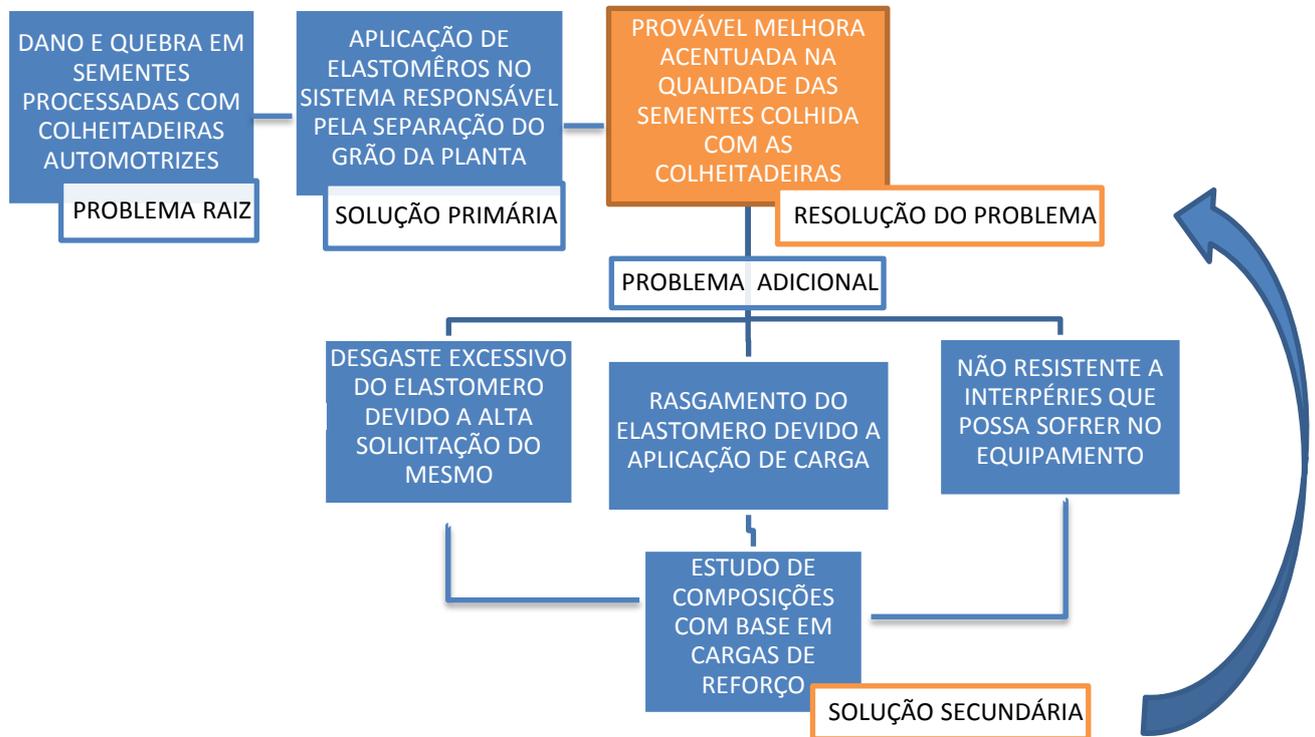


Figura 1.2. Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa sobre desenvolvimento de materiais alternativos baseados em elastômeros

- ✓ Etapa 2: Desenvolvimento de matriz, simulação numérica computacional do produto e análises detalhadas;
- ✓ Etapa 3: Produção e teste de protótipo;
- ✓ Etapa 4: Performance de campo das 03 amostras pré-selecionadas;
- ✓ Etapa 5: Análise dos resultados de campo, tanto do material desenvolvido quanto do produto obtido da colheita.

## **2. OBJETIVOS**

Este trabalho tem como objetivo desenvolver e avaliar diferentes composições elastoméricas com boas propriedades de resistência à abrasão, resistência ao intemperismo, aderência ao substrato metálico (aço) e bom desempenho dinâmico para aplicação em cilindro de trilha de colheitadeiras visando diminuir a quebra de grãos na colheita mecanizada.

### **2.1. Objetivos específicos**

- a) Analisar alguns poliméricos (borrachas) capazes de apresentar propriedades compatíveis para substituir aço em colhedoras automotrizes;
- b) Estudar as variáveis dinâmico e físico-mecânicas de materiais elastoméricos, bem como a processabilidade para elaboração de novos componentes;
- c) Analisar o impacto da redução de danos mecânico no grão com o novo material em desenvolvimento para culturas onde se utilizara colheitadeiras de grão;
- d) Melhorar o sistema de colheita, sendo desejável criar um material apto a ser aplicado em vários sistemas para colheitadeiras de alta performance;
- e) Estudar os fatores de equipamento colheitadeira e variáveis do material que possam afetar qualidade de grão.
- f) Tornar uma máquina colheitadeira com altos índices de quebra em uma máquina de alta performance de qualidade de grão somente com a introdução de novos materiais;
- g) Analisar as cargas de reforço para as composições de borracha, e o que elas possam vir a afetar a sua performance;

## **2.2. Hipótese investigada**

*Materiais elastoméricos capazes de reduzir a quebra de grão (semente) em relação aos metais em colhedoras automotrizes através da sua capacidade de absorção de energia gerada pelo carregamento e trilhamento de material no sistema industrial da máquina.*

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo são abordados os fenômenos de desgaste da borracha, bem como um histórico de aplicações, onde serão apresentados os tipos mais importantes de matrizes e de reforços.

É apresentada também uma breve fundamentação teórica do produto colheitadeira, focando principalmente o sistema de trilha, que é o alvo deste estudo.

#### **3.1. Sistemas de Processamento para colheita**

Os danos às sementes durante a colheita ocorrem especialmente na etapa chamada processamento da colheita. Especificamente, estes danos são atribuídos à ação do sistema de trilha, onde se dá o impacto ou esmagamento da planta contra o cilindro de trilha e o côncavo, impacto esse onde o metal que é o material de composição dos elementos internos da máquina transfere a sua energia de movimento para a planta e o material colhido. Esse impacto deveria ser somente para romper o invólucro da vagem (no caso das leguminosas), porém ele acaba transferindo essa energia ao grão que não tem resistência para absorver esse impacto e acaba quebrado ou danificado. Para melhor compreensão da ação do sistema de trilha, os próximos parágrafos descrevem brevemente as máquinas colheitadeiras.

Este processamento acontece em máquinas colheitadeiras (Figura 3.1) que são ferramentas básicas para qualquer produtor rural de pequeno, médio e grande porte de produção e são utilizadas para executar a função de colheita de determinadas culturas passíveis de serem colhidas e processadas em nível de corte

e separação. As colheitadeiras são responsáveis pela colheita de aproximadamente 85% da produção mundial de grãos, sendo máquinas dotadas de alta tecnologia, guiadas ou não por sistema GPS (Global Position System) e com computadores de bordo capazes de determinar a qualidade do grão colhido, além de demarcar as áreas onde a cultura é mais bem desenvolvida (Werner, 2013).



Figura 3.1. Vista perspectiva de uma colheitadeira de grãos convencional (Werner, 2013).

Os três sistemas que abrangem quase que a totalidade da produção de colheitadeiras são o sistema Convencional, sistema Axial Longitudinal e o sistema Híbrido. O número de máquinas convencionais no mercado ainda é maior, mas a produção de máquinas axiais vem despertando interesse a cada dia e superará o número de máquinas convencionais em breve. Já as máquinas híbridas, por utilizarem uma nova tecnologia, não podem ser comparadas quanto à superação dos números de convencionais e axiais, mas tudo indica que terão uma ótima aceitação no mercado (Höher, 2011). Vale ressaltar que todos os sistemas de colheita apresentam barras de trilha e seu sistema funcional.

Em se tratando de sistema de trilha, a colheitadeira possui em seu sistema industrial um cilindro de trilha dinâmico e um côncavo estático, localizados logo após

a plataforma de corte e sistema de transporte, como exemplificado na Figura 3.2. O sistema de trilha é onde os grãos começam a ser separados dos demais materiais, MOG (material além do grão), que fazem parte da planta. A partir deste ponto, uma perfeita regulagem da máquina define quanto de perda existirá na lavoura ou a qualidade que os grãos terão (Höher, 2011).

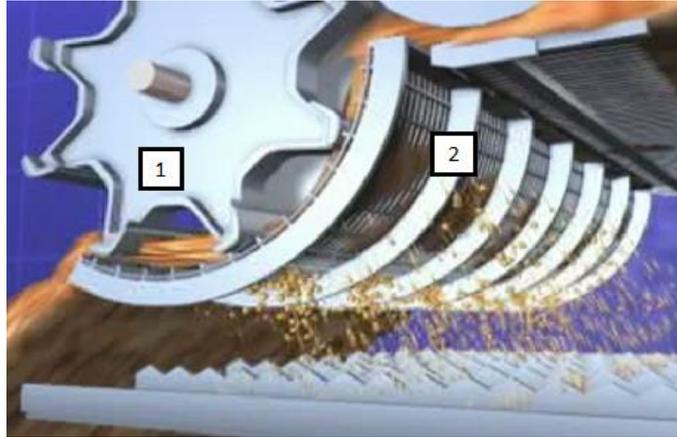


Figura 3.2. Sistema de trilha de uma colheitadeira Tangencial (1 – Cilindro de trilha, 2 – Côncavo de separação) (Werner, 2013).

O cilindro de trilha (Figura 3.3) já vem sendo usado há décadas em dispositivos de colheita não somente de grãos, mas de outras culturas. Basicamente, este é constituído de suportes centrais (usualmente denominados margaridas), um eixo de transmissão, e de barras de aço (barras de trilha) em sua extremidade.

Como já citado a rotação do cilindro varia entre 150 e 1800 RPM, mas a gama de rotações aplicadas para a colheita normal está entre 200 e 1200 RPM. Esta variação está diretamente relacionada com a capacidade de trilha do material. Quanto mais fácil de ser trilhado o material, menor é a rotação necessária para trilhá-lo (Werner, 2013).

Para Höher (2011), o cilindro pode ser construído de maneiras distintas dependendo da aplicação a que se destina. O cilindro de barras que está presente na maioria das colheitadeiras, cerca de 90%, é utilizado para as lavouras de grão e possui barras estriadas paralelas que facilitam a separação dos grãos e das vagens.

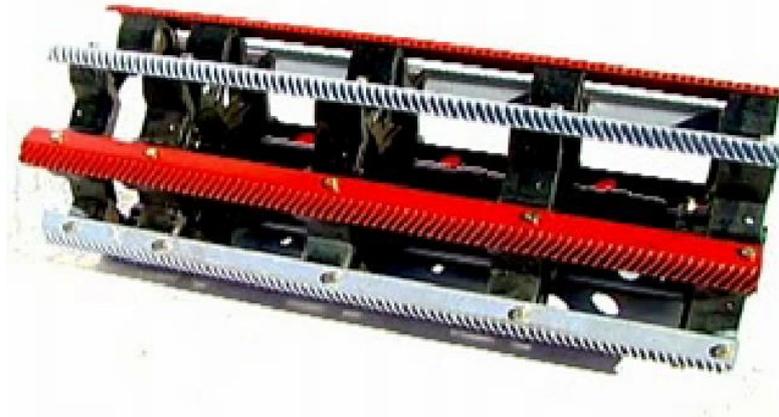


Figura 3.3. Cilindro de trilha de uma máquina tangencial (Werner, 2013).

As barras de trilha são constituintes de um tarugo basicamente um tarugo laminado e forjado, composto por gengivas que facilitam a separação das vagens. Na Figura 3.4 é apresentado o dimensional transversal em corte da barra de trilha. Este dimensional foi elaborado desde as primeiras trilhadeiras/colheitadeiras, e é aplicado até os dias de hoje com pequenas alterações

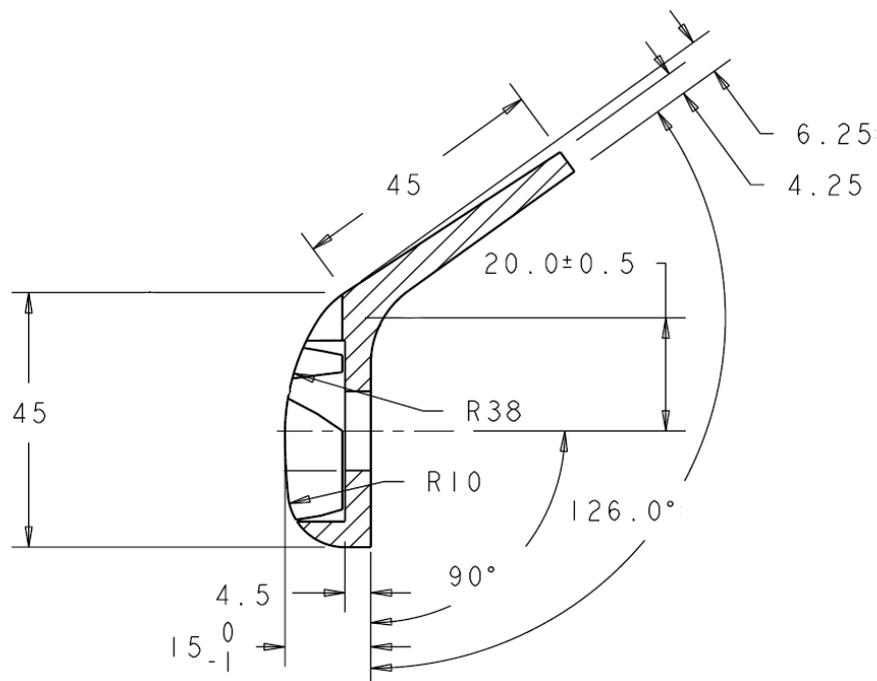


Figura 3.4. Dimensional padrão da barra de trilha (Werner, 2013).

O côncavo é o elemento filtrante do sistema de trilha, basicamente um separador do grão e palha/vagem/detritos, que se atrita com o cilindro de trilha. Este elemento é fixo (estático), ao contrário do cilindro de trilha que trabalha de forma dinâmica (Werner, 2013).

O côncavo é um conjunto de barras planas onde são fixadas perpendicularmente barras circulares ou arames (Figura 3.5) que podem variar de 3 a 6 mm de diâmetro. O espaçamento e o diâmetro das barras circulares são determinados pelo tamanho do grão que será colhido. Esta variação pode ser exemplificada na colheita do trigo, que por ser um grão pequeno e de casca muito resistente, é necessária a utilização de um côncavo com arames finos e com o espaçamento menor com relação ao côncavo utilizado para as demais lavouras (Höher, 2011).

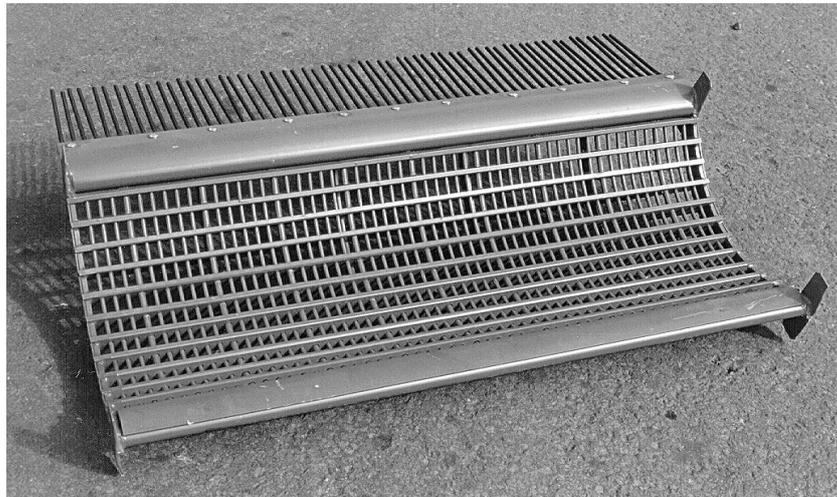


Figura 3.5. Côncavo do sistema de trilha (Werner, 2013).

### **3.2. Influências da máquina na Qualidade de Grão e Variáveis Agronômicas**

Não existe somente uma condição e regulagem em máquina quando falamos em qualidade de grão, pois temos as variáveis no equipamento, e no tipo de cultura, bem como a condição da cultura a ser colhida, onde as mesmas devem ser conhecidas pois tem influência direta na qualidade do grão. No que tange a condição

de cultura valores como umidade do grão irão impactar diretamente na capacidade de absorção de energia do grão, alterando assim valores de quebra e dano mecânico

Várias operações como a debulha, manuseio, descasque e moagem são realizadas com grãos. Se o ajuste de implementos durante as várias operações mencionadas não for devidamente realizado, pode ocorrer perda excessiva na colheita final. Conforme o censo da FAO, no Sudeste Asiático, 10% e 37% do arroz é perdido durante as operações de colheita, que inclui o corte, a manipulação, a debulha, a secagem, o armazenamento e o transporte (Zareifofoush et al. 2010).

Perdas de colheita de produtos incluem tanto as perdas quantitativas quanto qualitativas. Quantitativas são definidas como solto da palha e perda de palha, perda de dispersão e perda de grãos separados. Enquanto as perdas qualitativas incluem grãos rachados, danificados e grãos quebrados (Zareifofoush et al. 2010).

A diferença mais importante entre o arroz, o feijão e outros cereais são os aspectos econômicos e qualitativos da sua produção. Em contraste com outros cereais, os mesmos são de preferência consumidos como cereais integrais. Um critério importante para a qualidade da indústria do arroz e feijão é a porcentagem de todo o valor econômico dos grãos integrais no valor de aproximadamente o dobro de grãos quebrados (Zareifofoush et al. 2010). Já para Petkevichius et al. (2008), os índices de qualidade mais importantes para a cultura de milho são a perda de grãos, danos e separação côncava. O processo de debulha depende das características de variedades de milho, da concepção e da estrutura do aparelho de batimento e do seu ajuste.

Danos nos grãos ocorrem durante a debulha, a separação e o manuseio. A menos que o grão seja usado imediatamente para a alimentação do gado, a maioria dos compradores de grãos exigem um grau de qualidade em limites padronizados.

Além de uma norma geral do mercado, o comprador pode exigir um nível mais baixo de dano para usos particulares (Hanna et al.2007).

Além disso, a quebra de grãos afeta a germinação da semente, capacidade de armazenamento e qualidade de cozimento. Assim, é preciso o ajuste do equipamento de processamento de arroz e feijão colhido, sendo mais importante do que as outras culturas de cereais. Recentemente, vários estudos têm sido realizados para determinar os efeitos da colheita com máquina e as variáveis e condições ambientais sobre perdas de grãos de arroz em etapa diferente do processamento do produto, colheita à fase moagem (Zareifofoush et al. 2010). Considerando a importância econômica de grãos de arroz, essa informação pode ser usada para otimizar manipulação dos grãos no sistema e diminuir danos durante todo os processos (Zareifofoush et al.2010).

A Tabela 3.1 mostra o potencial de grãos quebrados (GQ) e grãos danificados (CG) sobre o processo de manipulação de grão em uma colheitadeira.

Tabela 3.1. Dano mecânico e quebra de grão durante a manipulação de grão em uma colheitadeira, indicando os efeitos do produto US (umidade da semente) e AA (ângulo de agressividade), e velocidade de rotação (RS) do caracol em danos de grão de arroz (Traduzido de Zareinfofoush et al.2010).

Origem		GQ %	GD %	GDR %	GR %
US	2	17,32	17,45	2,5	4
AA	2	1,87	8,02	0,65	1,46
RS	4	25,47	22,27	3,65	13,35
US x AA	4	0,06	0,17	0,07	0,24
US x RS	8	0,1	0,4	0,05	0,08
AA x RS	8	0,1	0,09	0,02	0,04
US x AA x RS	16	0,02	0,02	0,03	0,04
Erro	135	0,01	0,01	1,14	1,32
Coeficiente de Variação		14,83%	13,32%	19,67%	16,18%

GQ:grão quebrado, GD:grão descascado, GDR:grão descascado rachado, GR:grão rachado,  
US: umidade da semente, AA ângulo de agressividade, RS: rotação.

Feliz et al. (2005) avaliaram o efeito da velocidade do cilindro de trilha comparando com o dano do grão na colheita. Eles constataram que o cilindro, com velocidades superiores, produz significativamente mais danos aos valores de grãos ardidos do que em velocidades de cilindro de 550, 850 e 1000 rpm e, através desse feito, foram obtidos valores de quebra de 1,2, 4 e 9%, respectivamente. Para a manipulação e transporte de grãos, os dados mostraram que à medida que a velocidade de rotação do caracol se elevou, também aumentou quantitativamente a porcentagem de danos durante o processo de manipulação onde o caracol sem-fim foi utilizado (Zareifofoush et al. 2010).

Em se tratando de milho, as principais influências sobre sua debulha são a distância entre cilindro e côncavo, e também a velocidade periférica do cilindro. (Petkevichius et al. 2008). Petkevichius (2008) também afirmou que a velocidade de debulha de cilindro de 7m/s não foi suficiente para separar grãos a partir da espiga. Kravchenko e Kuceev (1999) constataram que a velocidade ótima da debulha no cilindro era 11 m/s.

A maioria das investigações da debulha das espigas com um mesmo teor de umidade revelaram que o menor dano em grãos do milho (11%) ocorreu quando o teor de umidade era de 28%. Em debulha de grãos de milho com 41% de umidade base úmida, os danos de grãos aumentaram para 33%. Wacker (2005) também afirmou que os danos aos grãos, em uma máquina debulhadora axial são menores que aqueles causados por uma máquina tangencial. O mesmo afirma Hanna et al. (2007), quando sustenta que os separadores rotativos exigem mais potência que o do saca-palhas, pois como eles moem sobre a palha, o dano no grão pode ser aceitável em uma ampla faixa de velocidade e a força de separação grão/palha é maior.

Vindizhev e Blaev (1983) demonstraram que a lesão de grãos de milho ocorreu quando o cilindro operado a uma taxa de 7 m/s e seu impacto coincidiu com a direção do eixo longitudinal de um grão. Quando a direção do impacto faz um

ângulo com o grão eixo longitudinal, o dano aparece nas velocidades de barras de 15 m/s durante a colheita de milho com o número de espigas alimentando o tambor de debulha variando consideravelmente. Petkevichius et al.(2008) verificou que durante o primeiro impacto na barra estriada o maior número de grãos da planta se trilha e também que os danos grãos aumenta com um aumento de taxa de alimentação de espigas.

A maioria das pesquisas em debulha de milho avaliou o processo de trilha no que diz respeito a danos de grãos e perda de grãos durante a debulha. No entanto, as razões para danos de grãos ou perda durante a debulha não costumam avaliar o movimento das espigas no aparelho de debulha (Petkevichius et al. 2008).

A Figura 3.6 ilustra o experimento feito por Petkevichius et al. (2008) onde mostra a variação de dano mecânico com a variação da velocidade no cilindro de trilha, considerando que 78% dos grãos debulhados passou através da côncavo e 7% do grão foi danificado. Hanna et al. (2007) também afirma que embora a debulha aumente com o aumento rotor/velocidade do cilindro e com a diminuição da depuração côncavo, danos no grão aumentam muito no processo de trilhar as espigas/cabeças de grãos mais resistentes.

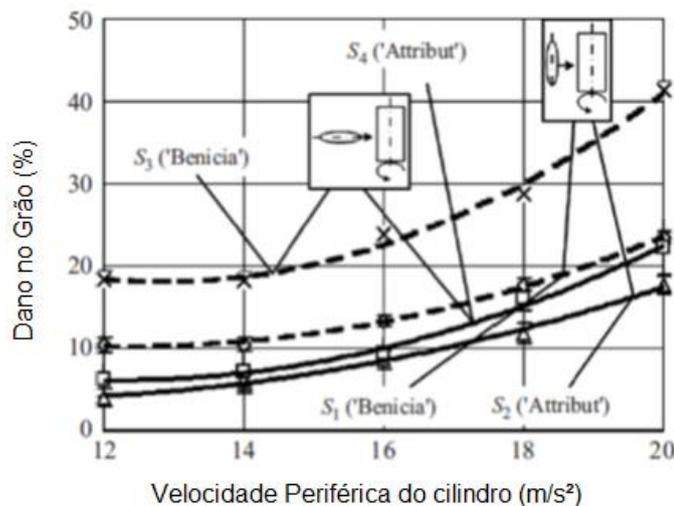


Figura 3.6. Influência da velocidade do cilindro de trilha sob a variedade de milho "Benicia" (Umidade 1 - 32,5% e Umidade 2 - 64,5) e "Attribut"(Umidade 1 - 18,5%, e Umidade 2 - 25,7%) (Adaptado e traduzido de PETKEVICHIOUS et al. 2008).

O Dano de grão é reduzido quando esta debulha acontece "grão em grão" ou quando a debulha ocorre com outro material da colheita, em vez do grão ser atingido por metais, no caso as barras estriadas (Petkevichius et al. 2008).

A análise dos dados obtidos por Saierad et al. (2008) com a semente de cominho revelou que entre três variáveis quantitativas, ou seja, teor de umidade, tamanho da semente e taxa de carregamento, o fator dominante na força de ruptura da semente sob carga quase estática é o teor de umidade. A força necessária para iniciar a ruptura de sementes com teor de água e tamanho das sementes variados é mostrado na Figura 3.7. A força de ruptura diminuiu com o aumento do teor de umidade das sementes.

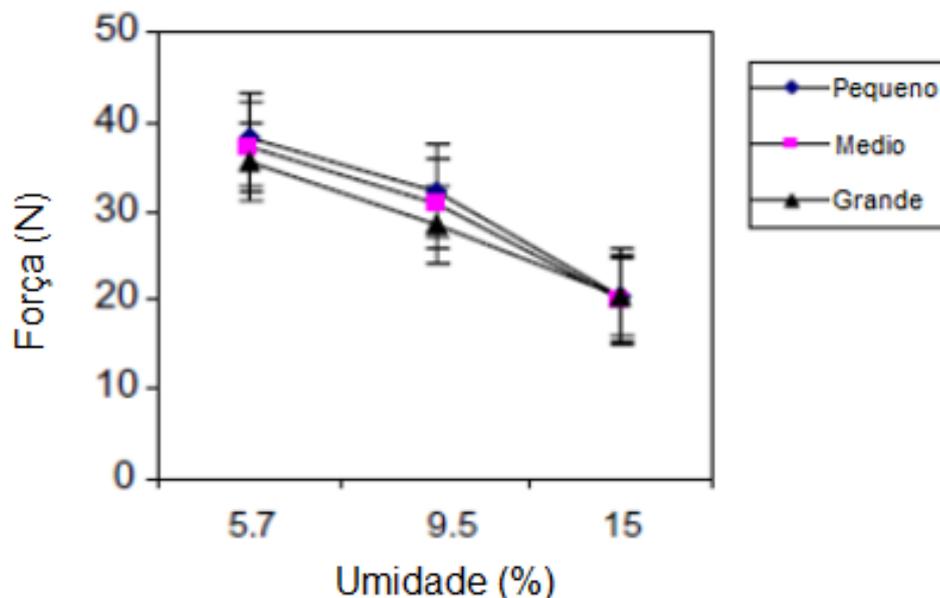


Figura 3.7. Efeito da umidade e tamanho de grão na força da ruptura da semente (Traduzido e adaptado de SAIEDIRAD et al. 2008).

Altuntas e Yildiz (2007) estudaram o efeito do teor de umidade e algumas propriedades físicas e mecânicas dos grãos de feijão e denotaram que, a força necessária para iniciar a ruptura da semente aumentou com o tamanho da semente,

de modo que a força média de ruptura foi de sementes pequenas de cerca de 1,4 vezes maior do que a de sementes grandes.

Tanto a força necessária para iniciar ruptura de sementes quanto a energia absorvida na ruptura podem ser fortemente correlacionadas com as variáveis umidade, tamanho da semente e taxa de carregamento. Estas relações estão apresentadas na tabela 3.2 para orientações de semente vertical e horizontal (Saiedirad et al.2008).

Tabela 3.2. Principal comparação da força de ruptura e energia da semente de cominho considerando o efeito da interação de taxa de carregamento e orientação da semente (Traduzido de Saiedirad et al.2008).

Taxa de carregamento (mm/min)	Orientação semente			
	Força de ruptura (N)		Energia de ruptura (J)	
	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
2	14,059	47,622	4,963	12,516
5	13,427	43,115	4,265	11,481

A resistência mecânica e a capacidade de deformação da semente aumentam, com o aumento do teor de umidade pois a capacidade de absorção de energia de sementes úmidas em comparação com as secas é superior, levando a uma maior resistência à ruptura durante a carga de compressão (Saiedirad et al. 2008).

### 3.3. Considerações, tipos de borrachas e aplicações

Partindo-se do pressuposto de que a transferência de energia no impacto do metal com o grão é alta, acabando por ocasionar o dano ao mesmo, tem se a ideia de que a aplicação de um material no sistema que possa absorver parte dessa energia, não a transferindo diretamente para o grão, poder-se-ia ter uma drástica diminuição na quebra e dano mecânico do grão. Materiais a base de borracha são conhecidos pelo amortecimento de energia, e poderiam ser a escolha óbvia para a

aplicação pois além disso apresentam capacidade de deformação e recuperação resultado da interligação das cadeias entre si durante o fenômeno conhecido por vulcanização.

As borrachas vêm ampliando sua gama de aplicações e, dentre as áreas com potencial de aplicação, destacam-se a mineração, conversão de energia, agricultura e transporte (Shah et al. 2013). Peças de borracha são amplamente utilizados no setor automotivo (vedação, buchas, pneus), construção civil (telhas, juntas de dilatação) e elétricos/eletrônicos (isoladores). O uso de produtos de borracha é inevitável em inúmeras aplicações quando elas cumprem funções de vedação em condições de lubrificação. Embora o desgaste possa ser considerado como uma característica do sistema, pois depende da configuração do equipamento, das características de superfície da outra parte, do carregamento etc. Os esforços e características internas do material foram sempre dedicadas para traçar os parâmetros do material, os quais controlam o desgaste, como consequência, algumas regras foram deduzidas das características de desgaste de metais, cerâmicas e até polímeros que dependem de variáveis do material selecionado (Karger et al.2008).

As borrachas podem ser de origem natural ou sintética. A borracha natural (NR), um poli-isopreno sintetizado por mais de 2000 espécies de plantas e alguns fungos, é um produto coagulado ou precipitado obtido da secreção láctea (látex) das plantas de borracha (Shah et al. 2013).

As borrachas sintéticas são produzidas a partir das matérias-primas originadas do processamento do petróleo, carvão, gás natural e acetileno. Embora as primeiras borrachas sintéticas tenham sido produzidas no início do século passado, apenas depois de 1950, com o desenvolvimento de catalisadores específicos, a borracha pôde ser sintetizada nas configurações cis e trans (Tanaka et al. 2001). Atualmente, cerca de 65% da borracha utilizada no mundo é sintética, desacando-se a borracha estireno-butadieno (SBR), os copolímeros (acrilonitrila

butadieno - NBR), copolímeros de etileno acetato de vinil (EVCL), polibutadieno e policloropreno (neoprene) (Dunn e Beswich 2013).

O pneu é um produto de composições de borracha e possui uma das propriedades mais importantes: a resistência a abrasão, que tem estreita relação com a durabilidade do pneu, no entanto, não é fácil prever o mecanismo de abrasão de borracha, uma vez que é complicado e afetado por muitos fatores (Wang et al.2013). Pneus usados em veículos de mineração são muito caros e precisam de manutenções regulares, para evitar substituição dentro de um prazo muito curto. As condições de trabalho acidentada nas indústrias de mineração reduzem a vida útil dos pneus por conta dos cortes, abrasão, desgaste, variações de velocidade etc. (Pal et al. 2010).

Na literatura consultada na área de máquinas, não se encontrou nenhum histórico na aplicação de elastômeros em sistemas de processamento de grãos, somente conhecimento empírico de tentativas malsucedidas não científicas onde os elastômeros não se mostraram resistentes e eficientes.

### **3.4. Problemas de abrasão de elastômeros**

Conforme já citado, e mencionado na literatura por Pal et al. (2010) e Tangudon et al. (2014), borrachas apresentam elevada resiliência, mas baixa resistência ao desgaste, apesar de o mesmo ser considerado uma característica do sistema (Karger et al. (2008). Por isso se faz necessário um estudo mais aprofundado e detalhado de como o mesmo acontece.

Para Tabsan et al. (2010) a abrasão de borracha é complexa e envolve mais do que um mecanismo. O processo de abrasão começa com o distanciamento de pequenas partículas de borracha, de alguns micra de comprimento. Com o esfregamento contínuo, partículas maiores da borracha, da ordem de várias

centenas de micra são removidas, e grande perda de massa (material) é então atribuída a estas partículas maiores. Para Pal et al. (2010), o desgaste da borracha é um fenômeno complexo e dependente de uma combinação de processos como o mecânico-químico e o termoquímico. Para Fukahori et al. (2008), no mecanismo de abrasão de borracha devem ser consideradas as relações empíricas entre a perda de abrasão no estado estacionário e o físico, bem como das propriedades mecânicas da borracha.

O desgaste de materiais elastoméricos pode ser classificado de acordo com o mecanismo responsável pela remoção de material da superfície em: (1) desgaste abrasivo, (2) desgaste de fadiga, e (3) formação do rolo (Tangudom et al. 2014). O modo mais severo de desgaste, o abrasivo, é causado pela ocorrência de arranhões e micro-cortes longitudinais podendo rasgar minúsculos pedaços, o que caracteriza a perda de material por abrasão. (Tangudom et al. 2014).

A abrasão de borracha em uma direção geralmente resulta em um padrão de superfície ou abrasão padrão (trilhas de desgaste). O padrão de abrasão é frequentemente detectado no fim do teste, e depende da severidade das condições de abrasão não serem suficientemente elevadas para suprimir totalmente a formação de padrões (Tabsan et al. 2010). Sugere-se que o desgaste abrasivo de borrachas amorfas é devido ao processo de crescimento das fissuras de fadiga. Como partículas de borracha sob carregamento repetitivo, quando este processo domina, o padrão de abrasão é desenvolvido (Tabsan et al. 2010).

O desempenho de elastômeros frente à abrasão depende muitas vezes da gravidade da abrasão. Tabsan et al. (2010) relataram a diminuição nas taxas de desgaste de polibutadieno em comparação a borracha natural e borrachas de butadieno estireno com força de atrito aumentada. Para Pal et al. (2010), um incremento na resistência à abrasão de produtos de borracha pode ser alcançado estudando os mecanismos de desgaste da borracha sob condição diferente da operacional.

Apesar de uma notável resiliência e alta resistência à tração, a borracha natural (NR) na maioria das aplicações pode apresentar baixa resistência à abrasão. No entanto, misturando-a com borrachas de alta resistência à abrasão e/ou acrescentado agentes de reforço inorgânicos e/ ou outras cargas de reforço, pode-se melhorar sua resistência à abrasão. A ideia de misturar borrachas sintéticas com borracha natural não é nova, mas só recentemente possível com consistentes resultados positivos pelo uso de novas técnicas ou novos ingredientes nas misturas (Pal et al. 2010). Já para Tangudon et al. (2014), a borracha natural (NR) tem excelente resistência à tração e ao rasgamento e boa resistência à abrasão, qualidades que são adequadas para a produção de o-rings, vedações, pneus, correias transportadoras e outros materiais de engenharia. A borracha estireno-butadieno (SBR) é geralmente aplicada em condições de desgaste, mas é inferior à NR em propriedades de tensão e do próprio desgaste.

### **3.5. Fatores que podem afetar o desgaste da borracha**

Uma vez conhecido como acontece a abrasão, se faz necessário conhecer os fatores que possam afetar este fenômeno, em prol de evidenciar e conhecer melhor essa característica dos elastômeros.

#### **3.5.1. Força sob a amostra**

Nos ensaios de Liang et al. (2010) ficou evidente que a força sobre a amostra de BR (Borracha de butadieno) resultou em grandes asperezas formadas na abrasão no estado estacionário. Quando estas asperezas são analisadas virtualmente, verifica-se valores muito baixos na taxa de liberação de energia resultando em uma abrasão muito mais lenta. Já o material NR (Borracha natural) tem a lingueta ou o micro corte mais longa da aspereza e este, por sua vez, gera valores muito maiores de energia para rasgar na raiz da aspereza (perda de

material), o que contribui para a fraca resistência à abrasão segundo Liang et al.(2010). A Figura 3.8 ilustra o fato.

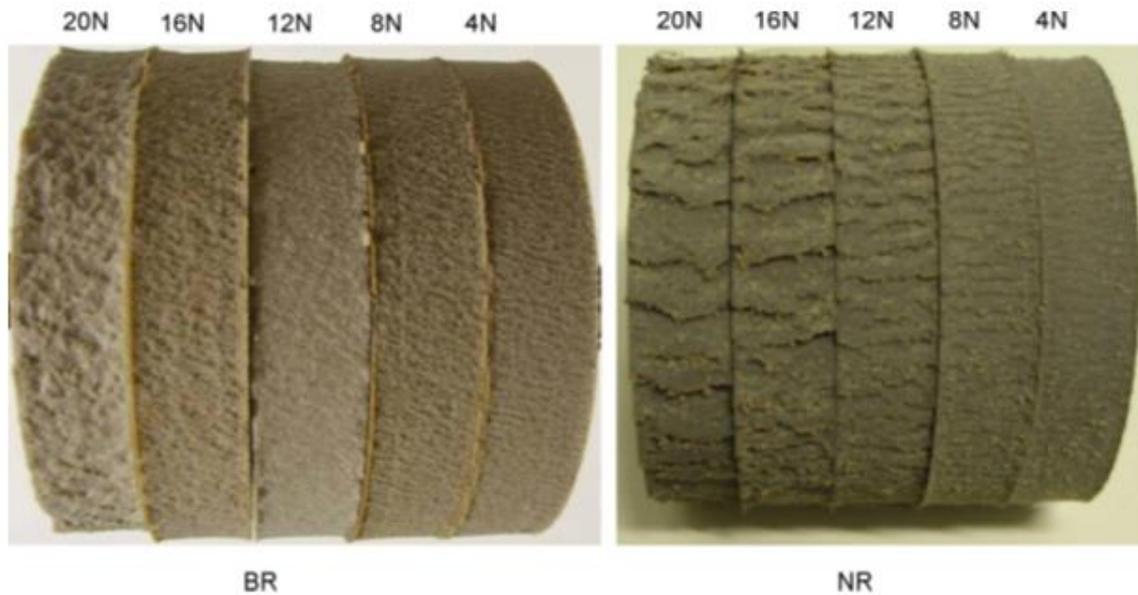


Figura 3.8. Abrasão de borracha de butadieno e borracha natural frente ao desgaste forçado na superfície (LIANG et al.2010).

### 3.5.2. Fator Geométrico

As observações experimentais de Gabriel et al. (2010) sugerem que um fator geométrico adicional também existe. Essa contribuição é dependente da profundidade de penetração da superfície rígida no elastômero, alterando o ângulo de contato entre ambas as superfícies. Em contraste, os testes usando uma geometria diferente (lisa) não apresentaram essa característica. A contribuição inteiramente geométrica aumenta consideravelmente o coeficiente de atrito real em comparação com o valor de entrada e é esperado ter uma contribuição significativa em muitas aplicações. Em aplicações reais, como na interface pneu-estrada, não é apenas uma única aspereza, mas uma vasta gama de asperezas vizinhas, cujas geometrias mudam com o tempo, que estão em contato com o pneu (Gabriel et al.2010).

Para Liang et al. (2009) o espaçamento e a altura das nervuras são uma característica de abrasão dos processos específicos. Com a abrasão, os sulcos se inclinaram para trás, protegendo a superfície e deitando imediatamente atrás de mais desgaste tornando a abrasão concentrada na raiz das nervuras. Liang et al.(2009) investigaram a abrasão utilizando uma agulha para arranhar a superfície de borracha sob condições controladas. Essa técnica forneceu percepção da natureza do processo de abrasão, mas tem limitações, como um ponto de contato com apenas uma quantidade muito pequena de borracha que foi removida em cada ciclo e do estado de tensão em torno de região de contato com a agulha era complexa durante a abrasão. Portanto, ainda Liang et al. (2009) desenvolveram um teste de linha de contato que utilizava uma lâmina. Com ela, eles propuseram uma teoria simples que relacionou a taxa de abrasão da borracha com a rachadura por fadiga, durante o crescimento da fissura da borracha.

Essa relação foi relatada como sendo dependente da geometria do corpo de prova. Ao utilizar uma roda de rolamento de borracha contra uma lâmina afiada, Liang et al.(2009) mediram a taxa de desgaste em estado estacionário utilizando a taxa média de perda de massa a partir da roda de borracha por ciclo e por medição da velocidade de avanço das saliências individuais ao longo da superfície.

### **3.5.3. Coeficiente de Atrito**

Experiências em materiais de borracha têm mostrado que o coeficiente de atrito de deslizamento numa interface está associado com uma contribuição da adesão à superfície, bem como no início da deformação elástica e visco-elástica da superfície de borracha. Liang et al. (2009) utilizaram uma técnica de elementos finitos para investigar a importância relativa de cada termo de atrito.

O coeficiente de atrito (COF) depende da composição da borracha, duração do teste e o tipo do equipamento de teste. Esse último afeta o COF principalmente através da pressão de contato, da temperatura, e do transporte dos detritos da área

de contato. No entanto, o COF de estado estacionário parece ser afetado ou diminuído com o teor CB (Carbon Black). A variação observada no comportamento de atrito e de desgaste pode correlacionar-se com as características das borrachas, pelo menos para uma determinada composição de borracha com uma única variável na receita (CB no caso desta formulação de EPDM) (Karger et al.2008). Já para Bhattacharya et al. (2010), o desgaste aumenta com o aumento da força de atrito, dependendo da natureza da borracha e da carga.

Pal et al. (2010) observou que, durante o atrito intenso, desenvolve-se uma temperatura elevada e, conseqüentemente, a resistência à abrasão da borracha depende, em grande maioria, da sua resistência à alta temperatura e calor. O mecanismo de desgaste fornece uma ligação entre a resistência à abrasão de borracha e de suas propriedades mecânicas, o que irá prever a vida de um produto em serviço e, também, desenvolver o método de teste de abrasão (Pal et al. 2010). Já para Tabsan et al.(2010), a formação de sulcos ou o padrão de abrasão nas superfícies dos compósitos deve-se pelo fato do processo dominante da abrasão ter sido o processo de crescimento de trincas por fadiga.

#### **3.5.4. Superfície de deslizamento**

Tangudom et al. (2014) notou também que houve uma diminuição da taxa de desgaste específica da amostra (NR) em aço, provocada por uma formação de película lubrificante entre as contrafaces, o que reduziu o contato com as asperezas da superfície do aço durante a abrasão e, portanto, ajudou a reduzir a deformação de borrachas, como mostrado na Figura 3.9 de superfícies desgastadas de compósitos de borracha.

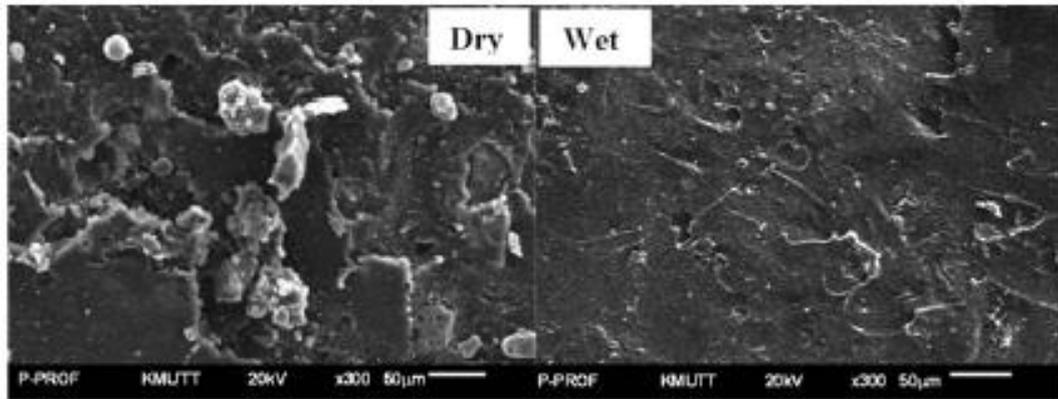


Figura 3.9. Superfícies da borracha NR desgastadas, sem formação de película a esquerda, e com formação de película a direita (Tangudom et al. 2014).

O desgaste por abrasão dos compostos de borracha contra um tecido contraface foi maior do que o encontrado nas contrafaces de aço e concreto, respectivamente. (Tangudom et al. 2014). Ainda Tangudom, observou que o composto de borracha sob uma contraface de abrasão do aço tem menor taxa de desgaste específico devido à menor rugosidade média do aço com as asperezas curtas, que apenas são levemente esfregadas as borrachas. Um outro motivo poderia ser a formação de manchas sobre a superfície do aço por degradação química da borracha natural a partir de efeitos oxidativos e da geração térmica durante a abrasão.

### 3.5.5. Velocidade de deslizamento

A Figura 3.10 demonstra a variação da taxa de desgaste de composições com SBR misturada com resina Novolar vulcanizada com diferentes fibras por atrito com as velocidades de deslizamento. Como pode ser visto, a taxa de desgaste da amostra sem fibra mostra uma perda drástica a 300 rpm. Esta mudança súbita na taxa de desgaste pode ser associada à mudança significativa nas propriedades dos materiais. Em outras palavras, os resultados obtidos suportam o fenômeno de transição vítrea definida com base no comportamento do sistema de desvanecimento. Abaixo de 300 rpm, a amostra sem fibra apresenta um

comportamento elástico e a taxa de desgaste é maior devido às propriedades mecânicas mais baixas do material (Saffar et al.2010).

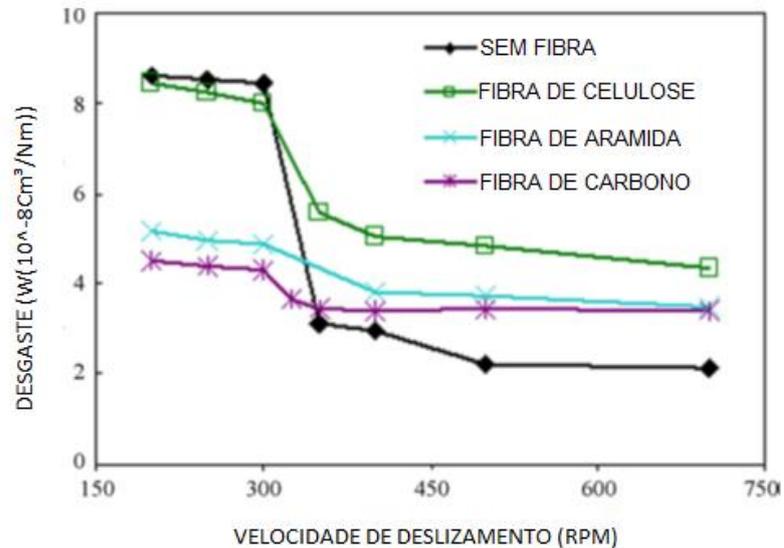


Figura 3.10. Velocidade versus taxa de desgaste em composições na matriz de SBR (Traduzido e adaptado de Saffar et al.2010).

### 3.5.6. Interação da Borracha e sua Resistência a Abrasão

A dureza de borrachas desempenha um papel importante no comportamento em fricção em comparação com a molhabilidade da superfície. As flutuações de coeficientes de atrito foram atribuídas à instabilidade da superfície das zonas de contato devido à viscoelasticidade das borrachas (Xiaoyan et al. 2010).

A resistência ao desgaste dos materiais mais resinosos é maior do que a de materiais compósitos à base de borracha. Este comportamento foi atribuído à cobertura da superfície de atrito fortemente aderida às camadas e multicamadas secundárias, que desempenha o papel de proteção da superfície subjacente. A menor resistência ao desgaste dos materiais à base de borracha foi atribuída à fraca resistência das camadas secundárias e ao grave mecanismo de desgaste abrasivo juntamente com fracas interações entre partículas de borracha que podem se desprender da matriz (Saffar et al. 2012).

Pal et al. (2010) sugere que a abrasão ocorre através de um processo cíclico de crescimento cumulativo das fendas e ao rasgamento. No que diz respeito às ideias físicas sobre a natureza da abrasão, Pal e colaboradores (2010) foram os primeiros a examinar o caso simples da falha de uma borracha pela ação de uma projeção difícil de mover-se sobre sua superfície.

### **3.6. Aditivação e modificação de matrizes para aumento de resistência dos materiais elastoméricos**

O aumento da vida útil de materiais de base elastomérica é usualmente obtido pela aditivação das matrizes poliméricas com cargas que minimizem os efeitos da abrasão sobre os materiais.

Segundo Tabsan et al. (2010), a adição de carga à matriz de borracha natural, pode resultar em um aumento de dureza e resistência ao rasgamento, o que poderia ajudar para melhorar a resistência à abrasão. Resultados semelhantes foram relatados e mostraram uma melhor resistência ao desgaste do material do copolímero de etileno/propileno/dieno (EPDM) e estireno/butadieno que, contendo diferentes teores de negro de fumo, correspondia a uma maior dureza dos compósitos. Já Mane (2013), afirmou que a borracha natural reforçada com sílica apresenta resultados similares às composições reforçadas com negro de fumo no quesito de desgaste.

Outra opção de modificação de materiais para aumento de sua vida útil poderia ser o uso de borrachas nanoestruturadas. Materiais elastoméricos nanoestruturados vem sendo utilizados progressivamente para uma série de aplicações onde os materiais são submetidos a atrito (Bhattacharya et al.2010).

Borracha natural (NR) é conhecida por exibir inúmeras propriedades, tais como: baixa permeabilidade a gases; melhor aderência em piso molhado; e resistência ao rolamento, juntamente com alta resistência a tração, tendo propriedades que se assemelham às de borrachas sintéticas. A NR com adição de BR (butadieno) e SBR (estireno) tem boa resistência à abrasão que são responsáveis as condições de funcionamento robusta de um pneu (Pal et al. 2010).

Em se tratando de EPDM, Karger et al. (2008) afirmam que os resultados de desgaste com essa matriz são diretamente afetados pelo percentual de carga. As velocidades de desgaste específicas sob ROP (Ring-on-Plate) corroboram este fato (Fig. 3.11). Esta é uma clara indicação de que os mecanismos de desgaste, incluindo o transporte dos detritos, devem ser semelhantes.

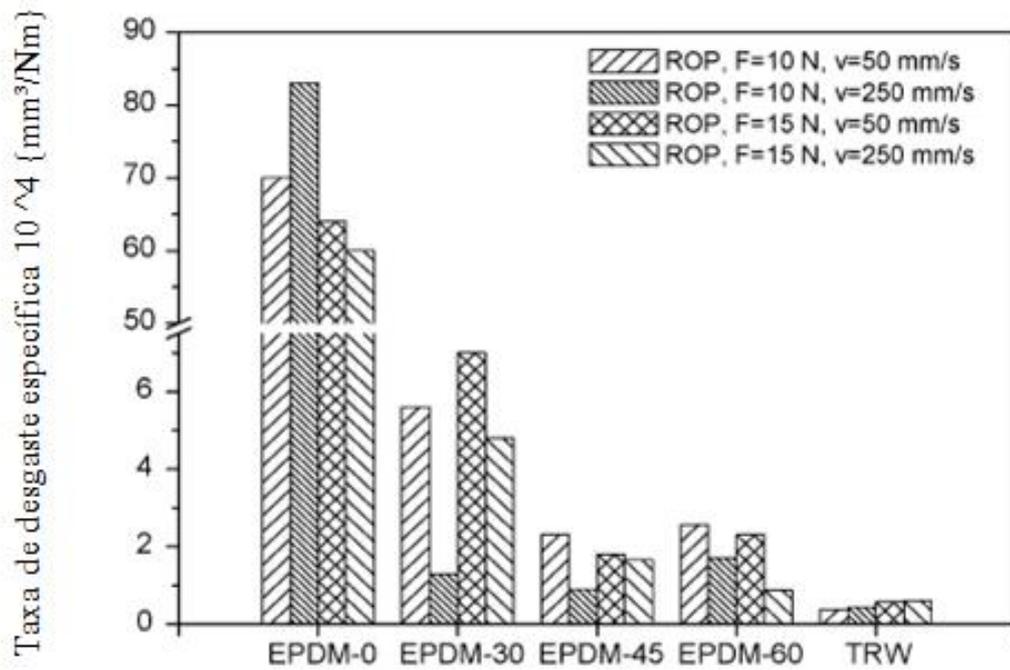


Figura 3.11. Desgaste de EPDM com variações de carga de NF sob diferentes condições de velocidade e força aplicada (Karger et al.2008).

Na produção de pneus utiliza-se grande percentual de borracha de estireno butadieno (SBR). Essa borracha traz propriedades como baixa dissipação de

energia durante a laminação, altas propriedades de tração etc. Estudos também têm sido feitos para encontrar cargas de melhor desempenho para o SBR, a fim de produzirem-se pneus de elevado desempenho com uma elevada eficiência energética (baixa histerese), elevada aderência em molhado e em gelo, de alta resistência ao crescimento de corte e uma boa resistência à abrasão (Das et al. 2012).

### **3.7. Propriedades e tipos de cargas utilizadas nas borrachas**

Uma ampla variedade de cargas de reforço particulado é utilizada na indústria da borracha para vários fins, sendo que o mais importante é o material de enchimento, pois traz entre outros benefícios, a redução dos custos de material e melhoramentos no processamento (Pal et al. 2010). Ahmed et al. (2014) cita que a eficiência das cargas como enchimento ou reforço depende de numerosos fatores, como: tamanho de partícula, área de superfície e forma da carga, e grau de dispersão. Negro de fumo e sílica são duas cargas usuais usadas para reforçar borrachas. Entretanto, altos teores são necessários para obterem-se as propriedades desejadas. O negro de fumo melhoram a rigidez e a resistência à abrasão, diminuindo a possibilidade de rasgar a borracha sob o contato deslizante (Tabsan, 2010).

Fu et al. (2013) fez experimentos com borracha natural adicionando nanopartículas de  $Al_2O_3$ . Os resultados são apresentados na Figura 3.12, onde é possível perceber que a perda de massa varia com o teor de carga, mas principalmente com a natureza da carga.

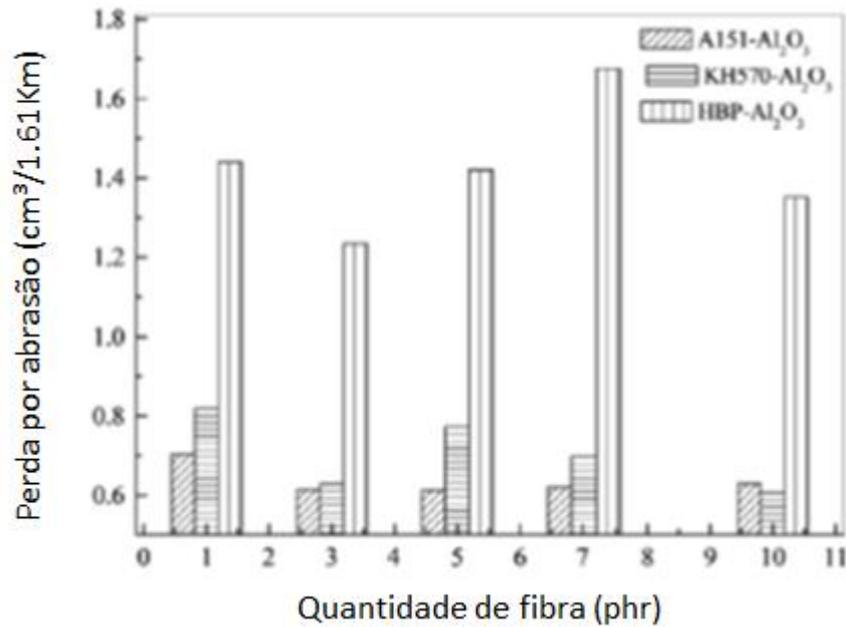


Figura 3.12. Desgaste da Borracha natural reforçada com Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e com diferentes agentes de acoplamento em percentuais diferentes (Fu et al.2013).

Outro tipo de carga utilizado como material de reforço é a sílica, também conhecida como carga branca. O efeito da sílica sobre algumas propriedades de borrachas é mostrado na Tabela 3.3 (antes de envelhecimento térmico/após envelhecimento térmico. (WU et al. 2013).

Tabela 3.3. Influência da sílica em diferentes tipos de borrachas (Traduzida de Wu et al.2013).

Borracha	Dureza Shore A	Resistencia a tração (MPa)	Alongamento (%)	Desgaste (cm³/1.61Km)
NR	37/40	8,24/5,07	342/49	0,4/0,8
SBR	42/54	8,80/6,10	599/27	0,6/0,8
BR	57/63	7,26/5,92	59/6	0,6/0,4
NBR	57/70	7,80/5,82	197/26	0,2/0,2
EPDM	51/62	7,27/5,34	191/141	0,2/1,0
CR	70/72	7,86/6,01	366/80	0,3/1,2

Percentual de carga de sílica em 40phr, 40phr, 40phr, 50phr, 50phr e 50phr respectivamente para NR, SBR, BR, NBR, EPDM e CR

Nos ensaios de Wu e colaboradores apresentados na tabela 3.3 é possível perceber que a sílica traz propriedades de reforço distintas para as diferentes

matrizes nas características citadas acima, independente de ser antes ou após o envelhecimento.

Miloskovska et al. (2015) cita a sílica como um material de difícil dispersão em matriz de EPDM devido ao seu tamanho muito pequeno (grande área de superfície) e forte tendência para se aglomerar. Estas propriedades das partículas, em combinação com a grande diferença no grau de compatibilidade com a matriz polimérica, têm como resultado uma mistura difícil. No entanto, um tamanho de partícula pequeno e uma boa dispersão por toda a matriz são essenciais para o reforço e propriedades mecânicas. Mastinu e Ploechl (2014) citam a sílica como importante reforço para pneus fora de estrada (*off-road*) onde ocorrem danos da banda de rodagem em que pequenos pedaços de composto são removidos e a sílica ainda melhora a resistência ao rasgo.

Os nanotubos de carbono possuem propriedades mecânicas que os tornam excelentes agentes de reforço em matrizes poliméricas, sendo que suas propriedades mecânicas dependem consideravelmente da distribuição de defeitos, bem como das interações entre as camadas nos SWCNT (nanotubos de carbono de parede simples) e aglomerados nos nanotubos de parede dupla (DWCNT) ou MWCNTs (nanotubos de paredes múltiplas), ilustrados na figura 3.13. A densidade de defeitos é potencialmente muito baixa neste tipo de nanoestruturas e os defeitos podem distribuir-se por uma grande distância devido ao diâmetro nanométrico e à elevada razão de aspecto ( $p = L/D$ , onde  $L$  = comprimento 1- 50  $\mu\text{m}$  e  $D$  = diâmetro, 1- 50 nm). Os CNTs podem possuir módulo de Young de 3 GPa a 1,8 TPa, tensão à tração uniaxial de 150 GPa e uma flexão de  $14.2 \pm 8$  GPa. Estes valores dependerão do método de síntese que definirá a quiralidade e o percentual de defeitos (Ramôa, 2011).

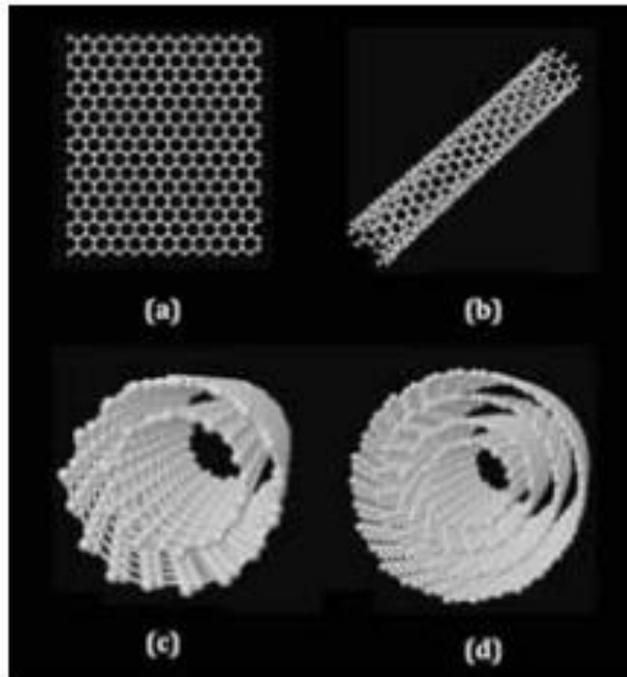


Figura 3.13. Estruturas provenientes de nanotubos de carbono: (a) folha de grafite; (b) SWCNT; (c) DWCNT; (d) MWCNT (Ribeiro, 2015)

Para Mattoso (2006), os nanotubos de carbono vêm revolucionando a nanotecnologia por exibirem resistência mecânica extremamente alta, podendo chegar a 400 vezes maior que a do aço, conseguida apenas pela forma como o carbono se organiza na escala nanométrica. Já Tzounis et al. (2014), afirma que a adição de nanotubos de carbono na matriz de borracha natural contribui para uma melhoria significativa em resistência à tração e módulo a diferentes alongamentos até 20 phr de carga nas composições. Pedroni (2009) também relata, em seus experimentos com SBS na matriz, que o módulo pode ser aumentado significativamente com a adição de percentuais acima de 3 phr, como demonstrado na Figura 3.14.

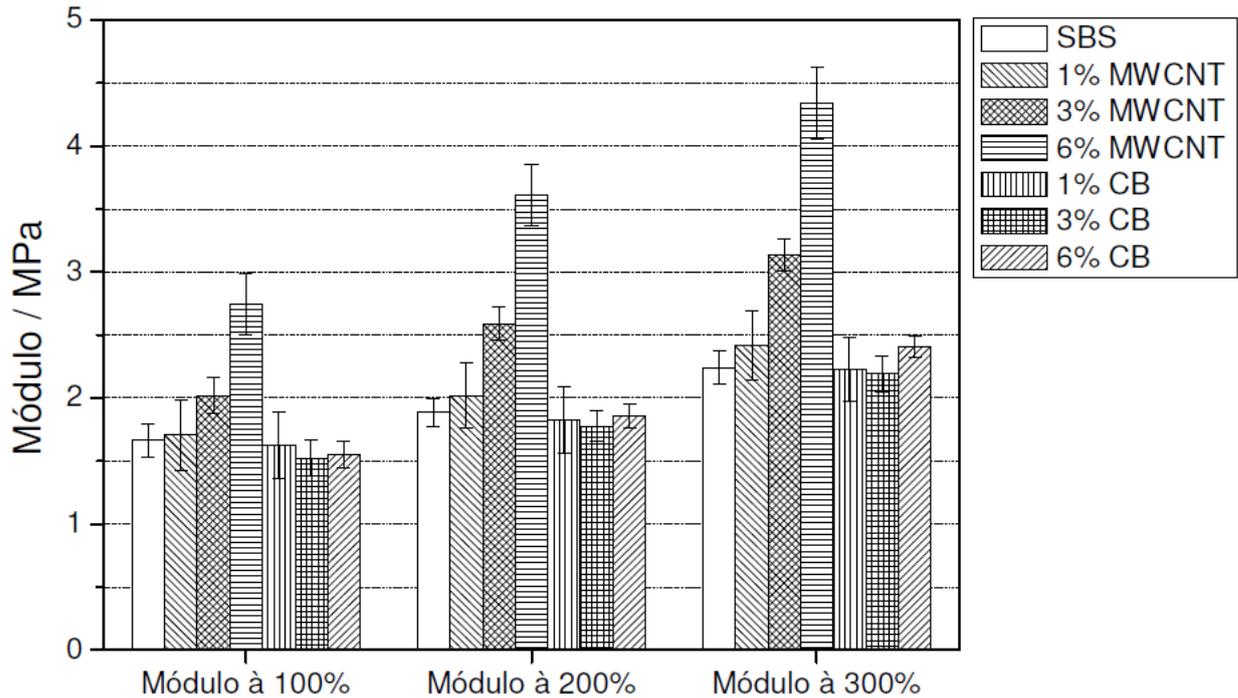


Figura 3.14. Módulos à deformação de 100%, 200% e 300% obtidos nos ensaios de tração dos compósitos extrudados em matriz de estireno-butadieno-estireno contendo teores diferentes de MWCNT e CB (NF) (Pedroni, 2009).

Além disso, uma melhoria notável de temperatura e de degradação térmica foi citada pelo autor. Pedroni (2012) afirma que o uso de nanotubos de carbono aumentam as propriedades mecânicas de matrizes NR/EPDM/SBR com proporções a partir de 3 phr de CNT. De acordo com González-Domínguez e colaboradores (2012), a adição de 5% em massa de MWCNT foi responsável por um aumento de 55% no módulo de armazenamento do PPS. Já a partir das análises de DMA, Ribeiro (2015) observou um aumento de até 130% no módulo de armazenamento dos compósitos de p-MWCNT/PPS em relação ao PPS puro quando 2,0 m/m% do nanoreforço foi considerado. A Figura 3.15 ilustra a morfologia dos nanotubos de carbono retiradas em MEV por Pedroni (2009).

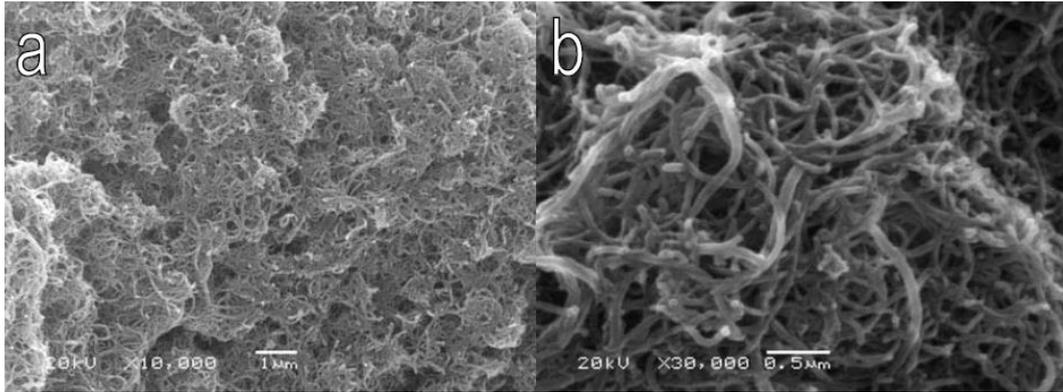


Figura 3.15. Microscopia eletrônica de varredura ilustrando a formação/dispersão de nanotubos de carbono do tipo de parede múltiplas (Pedroni, 2009).

Silva et al. (2013) observou em experimentos com PU reforçado por dióxido de titânio que o polímero se adere à superfície da carga, que age restringindo o movimento das cadeias do polímero. Conseqüentemente, há uma redução na elasticidade do material aumentando sua rigidez quando comparado ao polímero puro. De fato, em ensaio de fluência – recuperação fica evidente a diminuição do caráter elastomérico dos materiais com maiores teores de carga

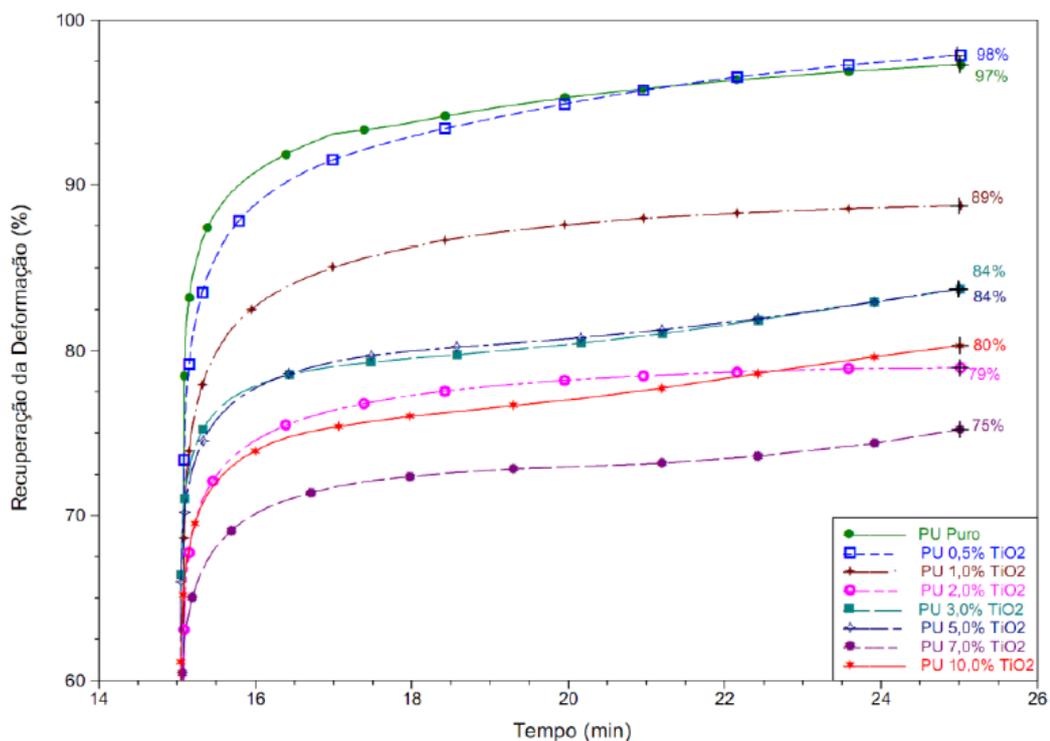


Figura 3.16. Análise recuperação da deformação do PU reforçado de com de TiO<sub>2</sub> (Silva et al. 2013).

Mesmo sendo com poliuretano e não com borracha, a figura 3.16 demonstra o nanocompósito com 7,0% de  $\text{TiO}_2$  foi o que apresentou menor recuperação (75%) quando comparado ao polímero puro que recuperou 97% da deformação sofrida.

Para Roberston (2008), a natureza, dimensões e morfologia das cargas também pode ter influencias tanto na performance, quanto na transição vítrea do material, o que pode ser visualizado pelo  $\tan \delta$  da figura 3.17, onde os experimentos foram realizados com borracha de polibutadieno reforçada com diferentes tipos de negro de fumo.

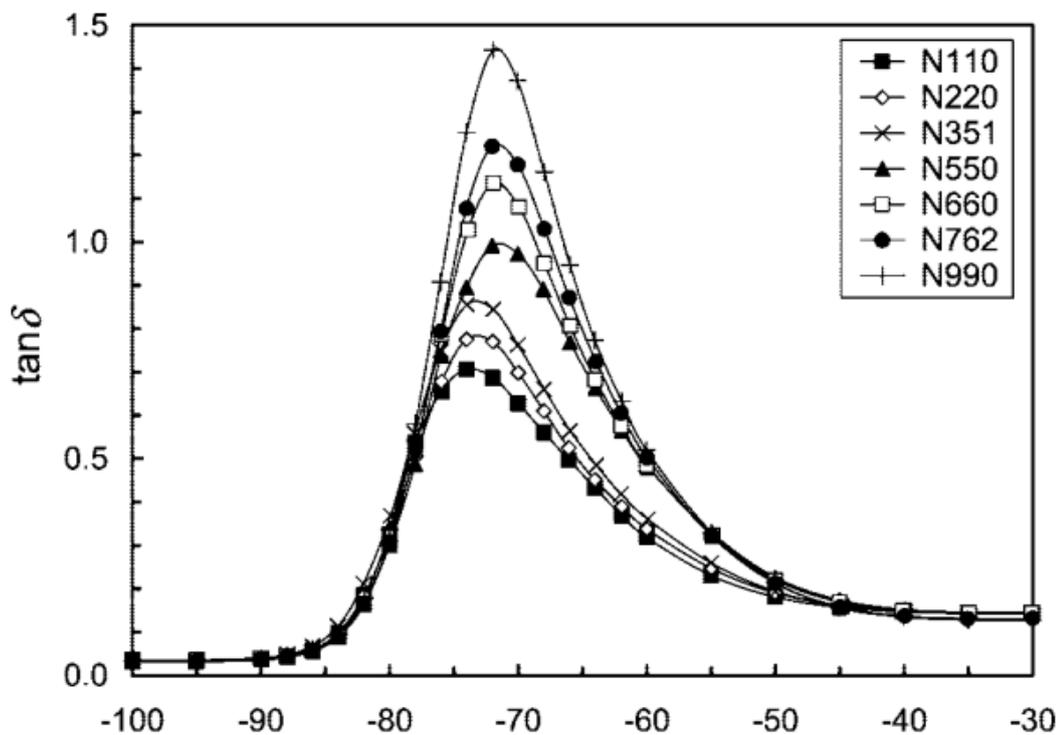


Figura 3.17. Curvas de  $\tan \delta$  para polibutadieno com diferentes CB, na região de transição vítrea (Robertison, 2008).

Nos dados apresentados na figura 3.17 apesar da pouca variação entre tamanhos próximos, foi possível visualizar que os extremos apresentam uma diferença maior, evidenciando que apesar de o reforço ser o mesmo, o seu tamanho irá modificar as propriedades.

Com base nos dados recém apresentados para aplicação de compostos de borracha, trabalhar-se-á em um conjunto de composições à base de borracha natural e EPDM com diferentes cargas de sílica, negro de fumo, e nanotubo de carbono visando a seleção de três composições para fabricação de amostras destinadas aos testes de performance/desempenho em campo.

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

Para o desenvolvimento deste trabalho utilizou-se a estrutura do Instituto de Inovação SENAI, unidade de São Leopoldo-RS, onde foram configuradas e testadas as composições elastoméricas. Utilizou-se também o laboratório de engenharia avançada da AGCO do Brasil, unidade Canoas-RS, onde foi configurada e pré-testada a colheitadeira usada nos testes de campo, e também os laboratórios de microscopia e de química da PUCRS para as análises pós-teste de campo.

Neste capítulo serão inicialmente apresentados os materiais usados na elaboração dos compósitos e os métodos utilizados para os ensaios em laboratório e, posteriormente, serão descritos os métodos e materiais utilizados para a condução dos testes de desempenho em campo.

### **4.1. Materiais utilizados para elaboração dos compósitos**

Por definição de projeto, foram elaborados sete compostos iniciais, baseados em matriz de borracha natural (NR) e EPDM, e para o sistema de cargas, foram utilizados negro de fumo (largamente utilizado como reforço), sílica e nanotubos de carbono do tipo multicamada, detalhados na sequência, bem como os aditivos.

As borrachas utilizados para elaboração dos compostos foram borracha natural SVR-3L (Standard Vietnamese Rubber) (NR) importada da Malásia pela empresa Mafer - SL e borracha de etileno-propileno-dieno (EPDM) KEP 350, produzida pela Kumho Polychem, com 56,5% em peso de etileno e 8,3% em peso

de ENB (Etilideno Norborneno). Para a plastificação da NR, adicionou-se um peptizante Pept 86 (blenda de complexo organometálico para reduzir a viscosidade mooney) e peptizante tipo fenilhidrazina), produzido pela Quisvi Química.

A fim de compatibilizar e homogeneizar a mistura entre EPDM e NR, foi utilizada uma mistura de resinas a base de hidrocarbonetos aromáticos, Struktol 40 MS, pois os mesmos dificultam algumas ligações indesejadas, o mesmo foi produzido pela Struktol Company of America.

As cargas de reforço utilizadas foram negro de fumo (NF) N220, adquirido da Aditya Birla; sílica de alta dispersão ULTRASIL 7000 GR, produzida pela Evonik; e nanotubo de carbono MWCNT NC 7000(múltiplas paredes), produzido pela Nanocyl. Para os compostos com sílica visando a otimização das propriedades, usou-se um agente de acoplamento, o silano bis tetrassulfeto, Si69, da Evonik, com 22,5% de teor de enxofre.

Como plastificante foi usado o óleo mineral, predominantemente parafínico, Flexpar 826 da QuantiQ. O sistema de proteção utilizado foi composto por uma mistura de ceras parafínicas, Q-Ozon produzido pela Quisvi Química; um antioxidante tipo TMQ (2,2,4-trimetil-1,2 dihidroquinolina polimerizada); e um antiozonante tipo 6PPD (N-(1,3-dimetilbutil)-N'-fenil-parafenilenodiamina).

No sistema de cura, utilizou-se o enxofre insolúvel 50% (masterbatch com 50% de enxofre), aceleradores TBBS 80% (N-tert-Butil-2-benzotiazolsulfenamida), TMTD (dissulfeto de tetrametiltiuram), ZBEC 70% (dibenzilditiocarbamato de zinco) e agente retardante PVI 80% (ciclohexil-N-tioftalimida). Os ativadores usados foram ácido esteárico e óxido de zinco.

## 4.2. Formulações e processamento

Foram desenvolvidas quatro formulações de borracha natural e três formulações com blenda de NR/EPDM. A formulação NR 50 NF foi inicialmente elaborada como piloto por ser uma composição comumente conhecida na indústria de borrachas, e transcrita para este trabalho inicialmente para fins comparativos com as demais formulações desenvolvidas.

Serão avaliados os diferentes tipos e teores das seguintes cargas abaixo e as respectivas nomenclaturas utilizadas:

- ✓ negro de fumo (NF);
- ✓ sílica (SIL);
- ✓ nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNT).

As formulações das composições de NR estão descritas na Tabela 4.1. Na Tabela 4.2 estão apresentadas as formulações de NR/EPDM.

Tabela 4.1. Formulações das composições utilizando-se NR

Formulações		NR 50 NF	NR 60 NF	NR SIL	NR MWCNT
Função	Insumos	Quantidades, phr			
Borrachas	NR SVR-3L	100	100	100	100
Peptizante	Pept 86	0,2	0,2	---	0,2
Ativadores	Oxido de zinco	4	4	4	4
	Ácido Esteárico	2	2	2	2
Sistema de proteção	TMQ	1,5	1,5	1,5	1,5
	6PPD	3	3	3	3
	Q-Ozon	2	2	2	2
Cargas	NF N220	50	60	30	55
	Sílica	---	---	30	---
	MWCNT	---	---	---	5
Agente de acoplamento	Si69	---	---	2,54	---
Plastificante	Óleo parafínico	3	3	3	3
Agente de cura	Enxofre insolúvel 50%	3	3	3	3
Acelerador	TBBS 80%	1,88	1,88	1,88	1,88
Retardante de cura	PVI 80%	0,25	0,25	0,25	0,25
<b>Total</b>		<b>170,83</b>	<b>180,83</b>	<b>183,17</b>	<b>180,83</b>

Tabela 4.2. Formulações dos compostos utilizando-se blenda de NR/EPDM

Formulações		NR/EPDM 60 NF	NR/EPDM SIL	NR/EPDM MWCNT
Função	Insumos	Quantidades, phr		
Borrachas	NR SVR-3L	70	70	70
	EPDM KEP 350	30	30	30
Peptizante	Pept 86	0,2	---	0,2
Agente homogeneizador	Struktol 40 MS	3	3	3
Ativadores	Oxido de zinco	4	4	4
	Ácido Esteárico	2	2	2
Sistema de proteção	TMQ	1,5	1,5	1,5
	6PPD	3	3	3
	Q-Ozon	2	2	2
Cargas	NF N220	60	30	55
	Sílica	---	30	---
	MWCNT	---	---	5
Agente de acoplamento	Si69	---	2,54	---
Plastificante	Óleo parafínico	3	3	3
Agente de cura	Enxofre insolúvel 50%	3	3	3
Acelerador	TBBS 80%	1,88	1,88	1,88
	<b>Total</b>	<b>183,58</b>	<b>185,92</b>	<b>183,58</b>

### 4.3. Preparação das composições

As composições foram preparadas em um misturador tipo Haake Rheomix 3000p, utilizando-se rotor tipo Banbury e fator de enchimento de 75% para os compostos da série NF e SIL e 70% para os compostos da série MWCNT, devido ao grande volume aparente dos nanotubos de carbono. A preparação dos compostos envolveu várias etapas: mastigação da borracha natural, silanização (para os compostos com sílica), mistura dos ingredientes no composto e aceleração. A figura 4.1 ilustra as etapas do processo para cada composição.

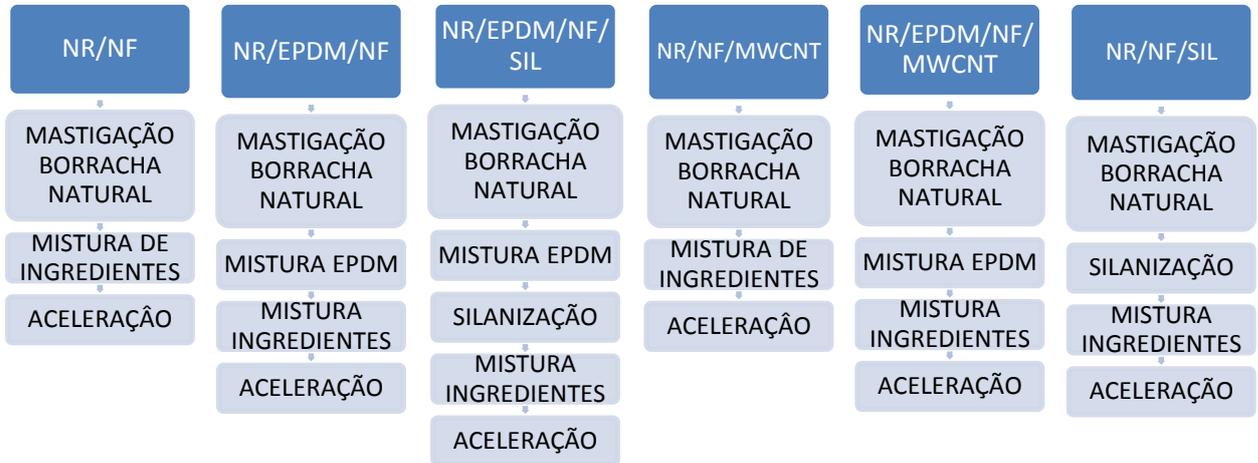


Figura 4.1. Processos de mistura utilizado em cada tipo de composição.

## 4.4. Equipamentos e Métodos

### 4.4.1. Curva Reométrica

A obtenção da curva de cura ou reométrica dos compostos foi realizada conforme a norma ASTM D 5289-12. Foi utilizado reômetro RPA 2000, a 160°C, por 30 min, sob deformação de 0,5° e frequência de 100 cpm.

### 4.4.2. Cura dos corpos de prova

Os corpos de prova para avaliação de resistência à tração, resistência ao rasgamento, dureza, resistência à abrasão e densidade foram obtidos de placas e

batoques curados das composições formuladas, de acordo com a norma ASTM D 3182 – 07 na temperatura de 160°C em um tempo de cura equivalente ao tempo ótimo de cura ( $t_{90}$ ) da curva reométrica mais 2 min. Os parâmetros de cura das composições estão resumidos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Parâmetros de cura dos corpos de prova

Amostra	Tipo de corpo de prova	Temperatura (°C)	Tempo (s)/(min)	Pressão manométrica (kgf/cm <sup>2</sup> )
NR 50 NF	Placa 2 mm	160	386 (6,43)	10
	Batoques (abrasão)			25
NR 60 NF	Placa 2 mm	160	388 (6,47)	10
	Batoques (abrasão)			25
NR SIL	Placa 2 mm	160	456 (7,60)	110
	Batoques (abrasão)			40
NR MWCNT	Placa 2 mm	160	370 (6,20)	110
	Batoques (abrasão)			40
NR/EPDM 60 NF	Placa 2 mm	160	300 (5,0)	110
	Batoques (abrasão)			25
NR/EPDM SIL	Placa 2 mm	160	482 (8,03)	110
	Batoques (abrasão)			30
NR/EPDM MWCNT	Placa 2 mm	160	346 (5,80)	110
	Batoques (abrasão)			40

#### 4.4.3. Viscosidade Mooney

A viscosidade Mooney dos compostos foi determinada utilizando-se um viscosímetro Mooney Alpha MV 2000, de acordo com a norma ISO 289-1:2005/14. A temperatura de ensaio foi de 100°C. Foi utilizado um filme de poliamida para isolar o corpo de prova da cavidade de ensaio.

#### **4.4.4. Dureza Shore A**

A determinação da dureza dos compostos foi feita conforme a norma ASTM D 2240-05/10 usando durômetro digital tipo Shore A Bareiss. A medida foi obtida durante 1 s, com auxílio de suporte para o durômetro, empilhando-se os corpos de prova em 3 camadas.

#### **4.4.5. Resistência à abrasão**

A resistência à abrasão foi avaliada segundo a norma DIN ISO 4649, utilizando abrasímetro IBAMA 1. A força aplicada sobre o corpo de prova foi de 10 N e para verificação da perda de massa foi utilizada balança digital Sartorius, com precisão de 0,0001 g.

#### **4.4.6. Tensão e alongamento na ruptura**

O ensaio de tração foi realizado conforme a norma ASTM D 412-06a em máquina universal de ensaios EMIC. Os corpos de prova foram do tipo C e o ensaio foi realizado com velocidade de afastamento de 500 mm/min.

#### **4.4.7. Resistência ao rasgamento**

A resistência ao rasgamento se procedeu conforme a norma ASTM D624-00 em máquina universal de ensaios EMIC, usando corpos de prova do tipo B (com entalhe de 0,5 mm). A velocidade de afastamento foi de 500 mm/min.

#### **4.4.8. Densidade aparente**

A densidade dos compostos foi determinada usando os corpos de prova preparados para o teste de resistência à abrasão. O método usado seguiu a norma ASTM D 297, utilizando balança digital Sartorius, com precisão de 0,0001 g.

#### **4.4.9. Resistência ao envelhecimento térmico**

A resistência ao envelhecimento térmico foi determinada com uma amostra de cada composição submetidas ao envelhecimento acelerado em estufa com circulação forçada de ar, a 70 °C, durante 70 horas, de acordo com a norma ASTM D 573:2004/15 utilizando uma câmara climática da Marconi, modelo MA 835/UR.

#### **4.4.10. Resistência ao ozônio**

A avaliação da resistência ao ozônio foi feita em uma amostra de cada composição onde as peças ficaram pelo período de 72h em uma câmara de ozônio modelo P3-C6, testes executados conforme a norma ISO 1431-1:2012. Para avaliação do perfil de fendilhamento foi usado estéreo microscópio Olympus modelo SZX16, com aumento de 7x (de acordo com a norma citada).

#### **4.4.11. Análise Dinâmico Mecânica (DMA)**

O ensaio de tensão-deformação foi realizado em um analisador dinâmico mecânico, modelo Q800 da TA Instruments, seguindo a norma técnica ASTM D822, as dimensões dos corpo-de-prova foram aproximadamente 20 x 10 x 0,1 mm. Para sequência de parametrização foi seguido a mesma utilizada nos ensaios de Tzounis (2014), com frequência de 10 Hz e variação de -80°C a 80°C.

#### **4.4.12. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)**

As medidas de Microscopia Eletrônica de Varredura foram realizadas em um microscópio Philips XL30. As amostras sólidas foram fixadas sobre uma fita de dupla face e posteriormente recobertas com ouro. As análises foram realizadas no LabCEMM, no laboratório central de Microscopia e Microanálise da PUCRS, utilizando o modo Elétrons Secundários (SE). Com esta técnica foi possível analisar a morfologia da superfície do material.

#### **4.4.13. Microscopia de Força Atômica (AFM)**

As análises de microscopia de força atômica (AFM) foram feitas em um microscópio Dimension Icon PT, Bruker, no modo quantitativo nanomechanical mapping do Laboratório Central de Microscopia e Microanálise da PUCRS. As varreduras foram feitas a temperatura ambiente (20 °C) e umidade controlada. Os dados de topografia obtidos com uma sonda de nitreto de silício (Scanasyst Air) com frequência de ressonância de 70 kHz e constante de mola igual a 0,4 N/m.

### **4.5. Caracterização das amostras para Implementação Computacional**

As propriedades mecânicas dos compostos desenvolvidos foram determinadas para a implementação computacional através dos ensaios de tração uniaxial, compressão uniaxial e cisalhamento puro. Os corpos de prova foram condicionados na temperatura de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa de  $50\pm 5\%$  por no mínimo 20 horas antes da realização dos testes. O ensaio foi realizado em ambiente controlado com temperatura de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa de  $50\pm 5\%$ .

#### **4.5.1. Ensaio de Tração Uniaxial**

Foram avaliados 3 (três) corpos de prova por amostra, conforme a norma ASTM D412 - Tipo C. O corpo de prova foi submetido a um esforço de tração uniaxial a uma velocidade constante de 500mm/min até sua ruptura. Ao final do ensaio, foi obtido o gráfico Tensão x Deformação característico de cada amostra.

#### **4.5.2. Ensaio de Compressão Uniaxial**

Foram avaliados 3 (três) corpos de prova por amostra de acordo com a norma BS903, de formato cilíndrico com dimensões nominais de  $\varnothing 29,0$  mm x 12,5 mm. O corpo de prova foi submetido a um esforço de compressão uniaxial a uma velocidade constante de 50 mm/min. Ao final do ensaio, foi obtido o gráfico Tensão x Deformação característico de cada amostra.

#### **4.5.3. Ensaio de Cisalhamento Puro**

Foram avaliados 3 (três) corpos de prova por amostra de acordo com a norma BS903, de formato retangular com dimensões nominais de 90,0 x 9,0 x 1,0 mm. O corpo de prova foi submetido a um esforço de cisalhamento a uma velocidade constante de 50 mm/min até sua ruptura. Ao final do ensaio, foi obtido o gráfico Tensão x Deformação característico de cada amostra.

### **4.6. Simulação Numérica Computacional**

A partir da definição da geometria do protótipo e da caracterização das propriedades mecânicas dos compostos, foi possível realizar estudos de caso por simulação computacional para observar o comportamento mecânico do protótipo em resposta a forças ou deformações impostas. O objetivo desta atividade foi conhecer

o comportamento do perfil de borracha frente as solicitações reais da aplicação que são muito complexas. Utilizou-se o software ABAQUS de análise por elementos finitos focando em um modelo reduzido do perfil de borracha, baseado no modelo real, no entanto formado por apenas um dente da trilha, e omitindo o inserto metálico (Figura 4.2). Utilizou-se um coeficiente de atrito de 0,15 nas análises, de acordo com Sun (2012).

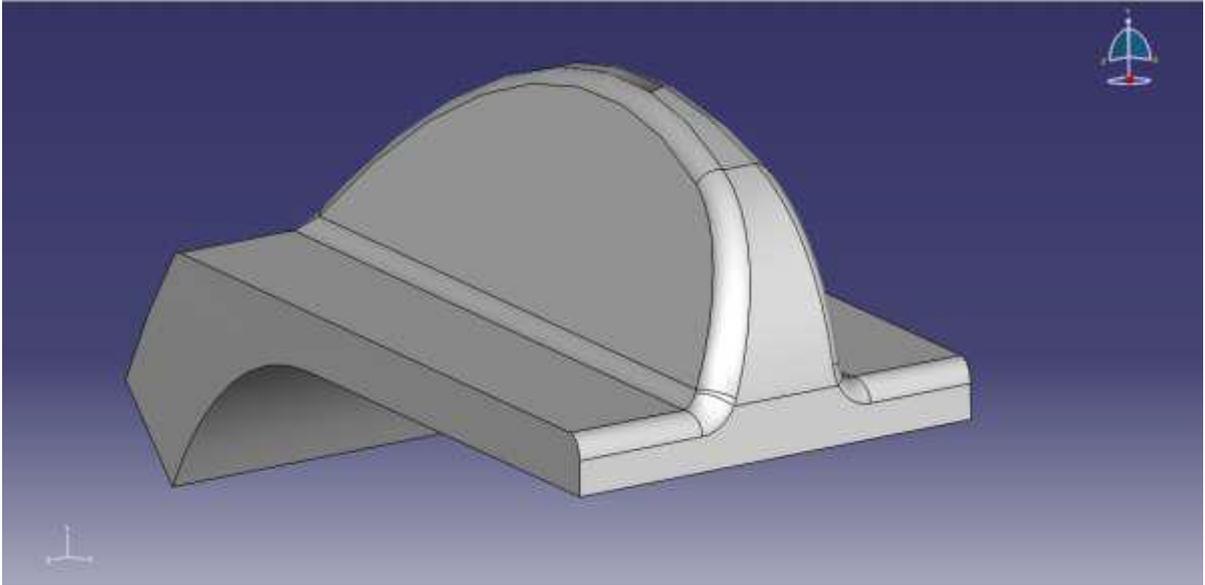


Figura 4.2. Modelo reduzido do perfil de borracha dimensionado como base no dimensional apresentado na Figura 3.4.

Foram idealizados 4 (quatro) estudos de caso, apresentados abaixo, onde se buscou representar situações extremas, coerentes de certa forma com a aplicação final, e de modo a possibilitar uma análise prévia do protótipo. As análises foram realizadas em regime quasi-estático de aplicação de cargas.

Estudo de caso 1: Análise pontual no modelo reduzido para que cada componente possa vir a sofrer uma carga de 200 N (20 kgf), em uma região centralizada no topo/meio da crista do dente, no sentido radial ao cilindro de trilhagem.

Estudo de caso 2: Análise baseada no movimento de trilhagem do cilindro, considerando que durante o giro de trilhagem, a trilha arrasta o material colhido

podendo gerar certa compactação do material. Para esse estudo foi idealizado um corpo cilíndrico se movimentando no início do perfil do dente até a meio do mesmo.

Estudo de caso 3: Avaliar o comportamento do dente contra forças distribuídas transversais. Para este estudo foi aplicado as cargas lateralmente distribuídas nas faces planas/laterais do perfil.

Estudo de caso 4: Partindo para uma abordagem diferenciada, buscou-se analisar situações mais próximas da real aplicação envolvendo grandezas relacionadas ao grão de soja. Foram investigadas, na literatura técnico-científica, informações pertinentes quanto ao tamanho de um grão de soja no momento da colheita e a resistência mecânica desse grão.

De acordo com França Neto et al., (2007), a soja deve ser colhida quando se encontra com teor de umidade em torno de 15% ou inferior. Segundo Ribeiro et al. (2007), um grão de soja nestas condições tem formato ovalizado de dimensões aproximadas de 10 mm longitudinal e 7 mm lateral e resiste a um esforço de compressão máximo entre 200 a 300 N. Esses dados foram adotados na modelagem do problema.

Para a modelagem não foi trabalhado com independência de malhas, pois a premissa era de ter apenas a noção da magnitude de tensões, e também sem nenhuma comparação entre simulações diferentes. Partiu-se do pressuposto que para elastômeros não é um caso muito crítico pois as variações de tensão são suaves devido as borrachas se deformarem com facilidade, diferente de quando se simula o aço, que têm grandes variações de tensão em pontos locais de concentração de tensão. O modelo de simulação usado para o elastômero foi o modelo Ogden incompressível de segunda ordem (coeficiente de Poisson foi atribuído como sendo 0,499)

Tipo de elemento utilizado para o elastômero foi o tetraédrico quadrático híbrido, e o tamanho 2,5mm, e nas regiões de contato elementos menores com 0,5 mm. Para o grão foi utilizado o elemento discreto rígido quadrilateral linear e

tamanho dos elementos de 1,1 mm, e para o indentedor em forma de calha foi utilizado o elemento discreto rígido quadrilateral linear, com tamanho de 2 mm.

#### **4.7. Definição e fabricação da matriz**

Por se tratar de um protótipo, o projeto de desenvolvimento da matriz de fabricação foi orientado pela minimização de custo e a rápida fabricação, garantindo a qualidade requerida. Foi também observada a possibilidade desta matriz ser empregada em nível de produção, contribuindo com seu retorno de investimento.

Sendo assim, optou-se pelo aço carbono SAE 1045. Apesar ser um material pouco nobre, confere à matriz características de durabilidade após o tratamento térmico, além de possuir boa usinabilidade, contribuindo na fabricação do molde. Devido à presença de um inserto metálico no protótipo, a matriz recebeu um tratamento térmico para aumento da dureza em sua superfície, no caso a carbonitreção, que lhe conferiu elevada dureza superficial e baixa deformação da matriz após o tratamento térmico, ambas são características desejáveis.

Por economia, a matriz é constituída de duas cavidades piloto. Uma para o protótipo com o estriado à direita e a outra para o estriado à esquerda, evitando a fabricação de duas matrizes. A Figura 4.3 ilustra o projeto da matriz. Um maior número de cavidades seria inviável economicamente pelo custo e, operacionalmente, pela dificuldade de manipulação do ferramental e da limitação de capacidade do equipamento de produção. Após o desenvolvimento do projeto da matriz, o mesmo foi enviado para fabricação por usinagem em CNC.

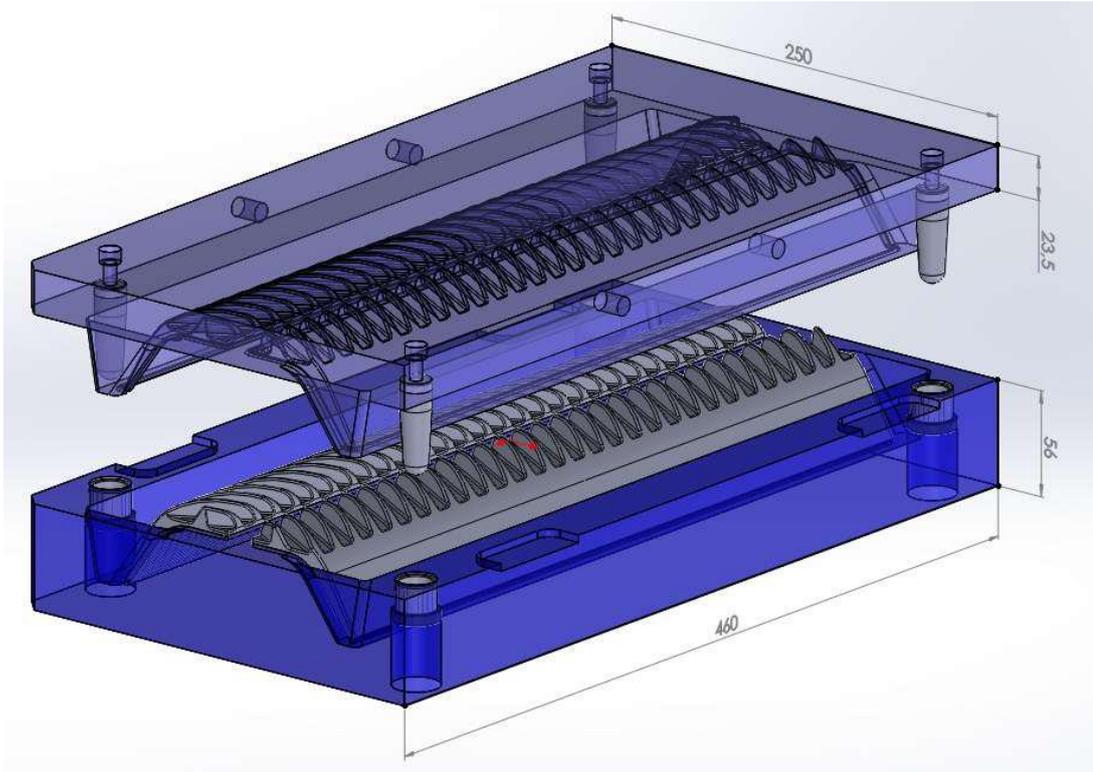


Figura 4.3. Desenho CAD da matriz desenvolvida.

O tamanho de peça final foi baseado no dispositivo construído por Werner et al. (2013), o qual delimita o tamanho da barra do cilindro em  $1/3$  do seu tamanho original, o que não prejudica a eficiência de trilha da colheitadeira e possibilita a fabricação de uma peça de menor dimensão mantendo as características originais. Mais detalhes podem ser vistos nos Anexos I e II.

#### **4.8. Elaboração do lote piloto dos compostos elastoméricos selecionados**

Nesta fase foi realizada uma análise detalhada de performance com base nos melhores resultados (ou melhor balanço dos mesmos) baseando-se nas características de processamento, resistência à abrasão/rasgamento e dureza e, então, definido 3 (três) composições para prototipação e performance de campo.

#### 4.9. Testes de Campo para qualidade de grão da cultura

Para a performance de campo, tanto na soja quanto no feijão foi utilizada uma colheitadeira do tipo híbrida, ou seja, de trilha tangencial e separação axial, da marca Massey Ferguson MF6690 ano/modelo 2014/2014, acoplada a uma plataforma do tipo esteira de 25" (7,62 m) de largura.

As amostras, pesando 1 kg, foram retiradas do tanque graneleiro da colhedora no ato da colheita. O teor de água das sementes/grãos foi determinado no campo por um aparelho portátil da marca Agrológic, modelo AL102 ECO e, em seguida, as amostras foram embaladas em sacos de pano para a execução da contagem grão a grão em laboratório.

Todas as coletas foram realizadas no caracol central do tanque graneleiro (Figura 4.4), ou seja, as quebras e danos mecânicos nos grãos neste local consideram o total de que a máquina causa para a cultura, somente desconsiderando o sistema de descarregamento

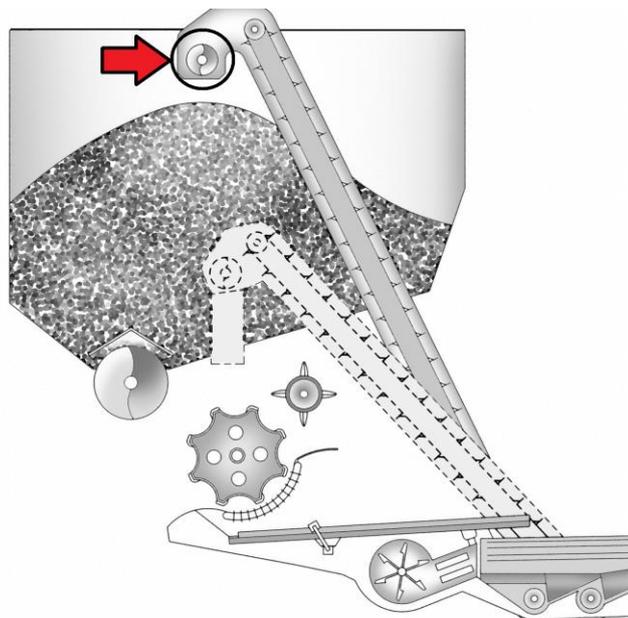


Figura 4.4. Detalhe da localização do caracol central dentro do armazenamento de uma colheitadeira de grãos.

#### 4.9.1. Colheita de Soja

Por se tratar de um cilindro tangencial, foram configuradas várias amostras em um mesmo cilindro de trilha, não sendo executado teste individualizado de diferenças de dureza para contextualizar dano mecânico a partir da quebra. As análises de desgaste foram executadas em um mesmo teste, ou seja, durante a colheita na mesma condição pela configuração de várias barras no cilindro de trilha.

O teste comparativo de materiais foi efetuado com as configurações originais da máquina, ou seja, cilindro de trilha com as barras metálicas, onde as mesmas sequências de testes foram executadas com a configuração das amostras desenvolvidas. A sequência mencionada trata-se da obtenção das amostras no tanque graneleiro da colheitadeira, entre 20 e 30 s após a entrada da plataforma de corte no talhão. O teste é executado desta maneira visando uma uniformidade no fluxo de grãos do sistema de trilha, sendo que o processador demanda no mínimo 20 s para completar um fluxo homogêneo de liberação de grão limpo e processado para o tanque graneleiro.

Optou-se por trabalhar em baixas rotações, estipulando-se inicialmente 3 (três) variações de rotação e, também, por critério de pressão sobre o cilindro, 3 (três) posições de côncavo (elemento filtrante em contato com as amostras) considerando trilha leve (posição 17 – Côncavo bem aberto), mediana (posição 13) e pesada (posição 08, a mínima abertura recomendada para a cultura de soja). Todas as coletas foram realizadas no tanque graneleiro, ou seja, as quebras e danos mecânicos nos grãos, nesse local, consideraram o total de que a máquina impacta para a cultura, somente desconsiderando o sistema de descarregamento.

#### 4.9.2. Colheita de Feijão

As amostras na quantidade citada anteriormente (item 4.9.) foram embaladas em sacos de pano e enviadas a Embrapa Trigo de Passo Fundo - RS para a execução das análises laboratoriais, exceto os pré-testes onde foi executado o mesmo roteiro, porém somente houve a medição de quebra de grão, sendo a mesma de maneira manual, sem a análise técnica.

Os parâmetros utilizados para avaliar a qualidade das sementes em laboratório nos testes finais foram: grau de umidade, características físicas (sementes quebradas e ruptura de tegumento); características fisiológicas de germinação e tetrazólio (vigor, viabilidade, dano mecânico).

O teste de germinação foi realizado com quatro subamostras de 50 sementes para cada amostra. As sementes foram semeadas em rolo de papel (tipo germitest) e colocadas em germinador a 25°C; a contagem foi efetuada no quinto dia após a semeadura, segundo (Brasil, 1992). Os dados obtidos foram expressos em percentagens de plântulas normais. Para a condução do teste de tetrazólio, utilizaram-se 100 sementes do cultivar, as quais foram acondicionadas em papel germitest, durante 16 horas, em temperatura ambiente. Passado esse período, as sementes foram retiradas e colocadas em copos bequer, numa solução de concentração de 0,075% de 2,3,5-trifenil cloreto de tetrazólio e colocadas no escuro, em estufa, com temperatura variando entre 35 a 40°C, pelo período de três horas. Após a lavagem em água corrente, as sementes foram analisadas individualmente, verificando-se percentagem de vigor (TZ 1-3), de viabilidade (TZ 1-5), de danos mecânicos (TZ 6-8).

Os dados obtidos foram apresentados em percentagem conforme descrito por Vaughan (1982). Já para a avaliação de sementes quebradas seguiu-se a

metodologia prescrita e sugerida por Mesquita et al. (1999), onde a análise de quebra de grão é estritamente manual, sendo que é feita a contagem de grãos quebrados, e pela proporção de grãos inteiros é alcançado a porcentagem de quebra. Para efetuar esta medição se utilizou uma balança da marca Vtec modelo 255 com precisão de 0,005 gramas.

As amostras enviadas para a Embrapa Trigo, que em conjunto com a Unilab (Laboratório de Análise de Sementes – Credenciado da Embrapa) serviram para realizar os testes de qualidade das sementes colhidas. No campo foram somente realizadas prévias de quebra de grão, e retirada a valor de umidade de cada amostra colhida.

Abaixo um pequeno resumo do conceito de cada resultado realizado/encontrado para os testes realizados no feijão:

Sementes Quebradas: Trata-se da mesma quantificação feita em campo, onde separam-se grãos quebrados em um ou mais pedaços, e quantifica-se através da pesagem.

Dano Mecânico: Dano mecânico do Teste de Tetrazólio, informa a porcentagem de sementes que foram responsáveis por inviabilizar a germinação. Isso afeta diretamente na viabilidade da semente.

Hipoclorito: Porcentagem de sementes com dano mecânico na amostra, quanto menor a porcentagem melhor. O teste de Hipoclorito informa a porcentagem de danos mecânicos nas sementes, independente de profundidade e local da batida.

Viabilidade das sementes: Porcentagem de sementes viáveis na amostra. É um teste comparativo a germinação. Quanto mais alto a porcentagem melhor. A viabilidade diminui a partir do aumento do dano mecânico.

Semente Pura: Porcentagem de sementes puras na amostra. Quanto mais alto a porcentagem melhor, ela é uma resultante dos grãos quebrados e eficiência do sistema de limpeza.

Todas as coletas foram executadas na mesma configuração de máquina. Rotação de motor de rotação de cilindro, 2220rpm e 450rpm respectivamente. Por critério aleatório 2 posições de côncavo, considerando trilha leve (posição 17 – Côncavo bem aberto), e pesada (Posição 07), e duas velocidades de máquina, 3km/h e 5Km/h, visando aumentar e diminuir o fluxo de material tornando possível visualizar as diferenças entre sementes com esta variável alterada.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Resultados dos ensaios laboratoriais

#### 5.1.1. Características de processamento das composições

Todos as composições avaliadas apresentaram processabilidade satisfatória no misturador fechado tipo Haake e no misturador aberto (cilindro). Os compostos com sílica (NR SIL e NR/EPDM SIL) apresentaram um maior consumo de energia e tempo de mistura devido à necessidade de uma etapa adicional de silanização (Tabela 5.1). As composições com nanotubos de carbono (NR MWCNT e NR/EPDM MWCNT) apresentaram um maior consumo de energia e tempo de mistura em relação aos compostos com negro de fumo puro (NR 60 NF e NR/EPDM 60 NF). Desta forma optou-se por dividir a adição das cargas nas composições de MWCNT em mais etapas. Também se observou um maior uso de energia na elaboração dos compostos com blendas dos elastômeros NR/EPDM em relação aos compostos com NR, com exceção na mistura com 60NF.

Tabela 5.1. Tempo e Energia consumida durante processo de mistura das composições.

<b>Formulações</b>	<b>Tempo de mistura (min)</b>	<b>Energia consumida na mistura (kJ)</b>
NR 50 NF	15,4	86.600
NR 60 NF	15,6	86.800
NR SIL	24,8	131.400
NR MWCNT	18,6	101.100
NR/EPDM 60NF	16,6	87.200
NR/EPDM SIL	27,2	160.400
NR/EPDM MWCNT	17,9	108.200

### 5.1.2. Viscosidade Mooney

A viscosidade Mooney, utilizada para medir as propriedades reológicas das composições, é uma propriedade importante para prever o comportamento nos processos dependentes do fluxo. Logo, uma viscosidade Mooney muito alta, acima de 75 (CML 1+4 (100°C)), dificulta o fluxo do composto na matriz durante o processo de moldagem por compressão, que será utilizado para a vulcanização das trilhas emborrachadas. A Tabela 5.2 apresenta os resultados encontrados para as composições estudadas.

Tabela 5.2. Viscosidade Mooney (C – Composto de borracha/M – Unidade Mooney/L – Tamanho rotor/1 – Tempo pré aquecimento corpo de prova/4 – Tempo que é medido o valor da viscosidade/100° - Temperatura do teste

Compostos	Viscosidade Mooney, CML 1+4 (100°C)
NR 50 NF	57
NR 60 NF	66
NR SIL	53
NR MWCNT	79
NR/EPDM 60 NF	63
NR/EPDM SIL	67
NR/EPDM MWCNT	94

Observa-se que os MWCNT conferiram uma viscosidade Mooney muito elevada aos compostos NR MWCNT e NR/EPDM MWCNT, provavelmente pelo alto potencial de reforço dos nanotubos, o que tornou essa composição não-adequada para o processo de moldagem que foi utilizado para a confecção do produto. Logo, para utilização deste aditivo, foi necessária uma adequação das formulações.

Os compostos com sílica (NR SIL e NR/EPDM SIL) apresentaram a viscosidade mais baixa de todos os compostos avaliados, devido, principalmente, ao

processo de silanização (para promover a ligação química, onde o polissulfeto substitui o átomo de hidrogênio na cadeia polimérica (Braum, 2006)) e à plastificação elevada. Porém ainda dentro de uma faixa adequada para o processo de moldagem e vulcanização, assim como os compostos com negro de fumo (NR 60 NF e NR/EPDM 60 NF).

### 5.1.3. Parâmetros de cura

A Tabela 5.3 e a Figuras 5.1 apresentam os resultados dos parâmetros de cura e as curvas reométricas obtidas dos compostos avaliados. O torque mínimo (ML) observado nas curvas reométricas relaciona-se com a viscosidade Mooney dos compostos. Quanto maior a viscosidade Mooney, maior o torque mínimo encontrado, conforme pode ser observado nas Tabelas 5.2 e 5.3. Já o torque máximo (MH) relaciona-se com o módulo de deformação das composições e quanto maior o módulo, maior o torque, o que pode ser observado nas Tabelas 5.3 e 5.4.

Observa-se um comportamento bastante diferenciado entre as três cargas avaliadas. Os MWCNT's, devido a sua alta razão de aspecto, aumenta significativamente o torque mínimo (ML), o torque máximo (MH) e a viscosidade dos compostos (NR MWCNT e NR/EPDM MWCNT) dificultando o fluxo dos mesmos no molde durante o processo de moldagem e vulcanização, acarretando deformações nas placas curadas. Os compostos com sílica (NR SIL e NR/EPDM SIL) apresentaram o mais baixo ML, devido ao processo de silanização e plastificação elevada para estes compostos. Os compostos com negro de fumo (NR 60 NF e NR/EPDM 60 NF) apresentaram ML e MH intermediários aos compostos carregados com sílica e MWCNT.

A menor velocidade de cura foi encontrada nos compostos com sílica (NR SIL e NR/EPDM SIL) o que já era esperado devido à adsorção dos aceleradores que ocorre neste tipo de carga, refletido no tempo ótimo de cura mais elevado. No entanto, os compostos com MWCNT's apresentaram uma maior velocidade de cura

que pode ser justificada pelo incremento na condutividade térmica destes compostos com a adição dos nanotubos.

Tabela 5.3. Parâmetros de cura dos compostos obtidos nas curvas reométricas

Compostos	Torque mínimo (ML), dN.m	Torque máximo (MH), dN.m	$\Delta$ Torque, dN.m	Tempo de pré-cura (ts1), min	Tempo ótimo de cura (t90), min	Velocidade de cura t50, dNm/min
NR 50 NF	2,2	15,4	13,2	1,9	4,4	7,4
NR 60 NF	2,5	17,8	15,3	1,7	4,1	9,1
NR SIL	2,1	14,6	12,5	2,2	5,5	5,0
NR MWCNT	4,4	22,9	18,5	0,6	4,3	10,9
NR/EPDM 60 NF	2,7	17,7	15,0	1,6	4,2	8,1
NR/EPDM SIL	2,0	14,0	12,0	2,1	6,0	4,3
NR/EPDM MWCNT	4,7	22,8	18,1	0,4	4,0	11,2

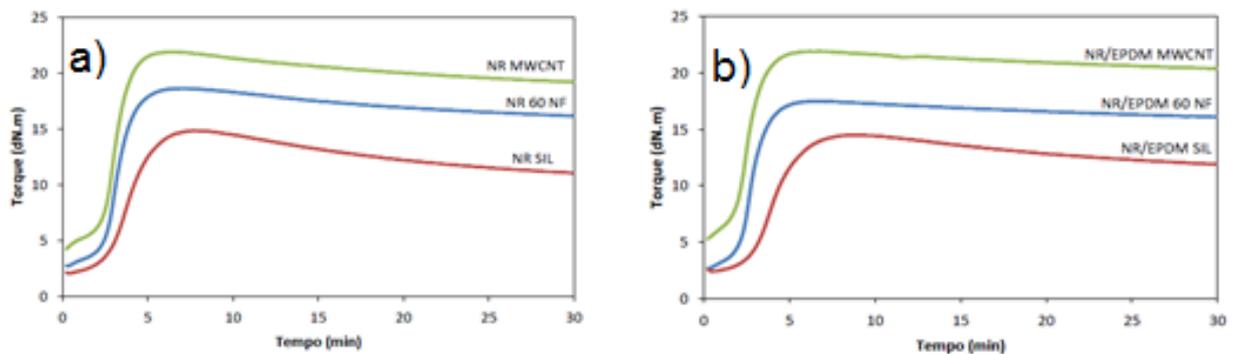


Figura 5.1. Curvas reométricas dos compostos de NR (a) e blenda de NR/EPDM (b)

#### 5.1.4. Propriedades físico-mecânicas

A Tabela 5.4 apresenta as propriedades físico-mecânicas das formulações estudadas. A formulação NR 50 NF foi inserida inicialmente nas tabelas com a finalidade de comparar as propriedades deste composto de dureza mais baixa, 61 Shore A, em relação aos demais.

Os valores mais elevados de dureza, módulos a 100% e 300% foram observados nos compostos com MWCNT. As formulações com NR apresentaram melhores propriedades de resistência ao rasgo quando comparadas com as blendas NR/EPDM como apresentado na tabela. Já o alongamento na ruptura as amostras com somente NR ficaram ligeiramente superiores com exceção da amostra de EPDM/MWCNT. Os testes de dureza, módulo, resistência ao rasgo, alongamento e tensão na ruptura foram somente executadas em uma amostra, porém com duas análises.

Tabela 5.4. Dureza, Resistência à Tração e Rasgo dos compostos avaliados

Compostos	Dureza, Shore A	M100%*, MPa	M300%*, MPa	AR*, %	TR*, MPa	Rasgo*, N/mm
NR 50 NF	61±2	2,6±0,1	14,5±0,2	470	27,9±0,1	138,6±0,2
NR 60 NF	67±2	3,6±0,1	17,5±0,2	400	23,8±0,2	204,8±0,2
NR100 SIL	64±1	2,8±0,2	12,7±0,2	480	23,0±0,1	129,7±0,3
NR MWCNT	73±2	5,3±0,2	18,4±0,1	420	25,5±0,2	162,4±0,2
NR/EPDM 60 NF	70±1	3,4±0,1	13,0±0,1	390	17,0±0,1	131,8±0,2
NR/EPDM SIL	66±1	3,4±0,1	12,0±0,2	360	14,8±0,1	76,5±0,1
NR/EPDM MWCNT	76±1	5,0±0,2	14,2±0,2	410	18,8±0,2	108,7±0,3

\*M100% - Modulo a 100%; M300% - Modulo a 300%; AR – Alongamento na ruptura; TR – Tensão na ruptura; Rasgo – Propagação do Rasgo

Os menores valores de desgaste por abrasão foram obtidos com as formulações onde se utilizou MWCNT, provavelmente ao alto potencial de reforço nessa carga, juntamente com a de NR60NF o que pode ser atrelado a quantidade ótima da carga na mistura, conforme se observa na Tabela 5.5.

Tabela 5.5. Abrasão e densidade das composições

Compostos	Abrasão*, mm <sup>3</sup>	Densidade, g/cm <sup>3</sup>
NR 50 NF	105±1	1,109±0,003
NR 60 NF	83±2	1,123±0,003
NR100 SIL	110±2	1,148±0,001
NR MWCNT	72±1	1,134±0,002
NR/EPDM 60 NF	108±1	1,118±0,002
NR/EPDM SIL	126±2	1,134±0,002
NR/EPDM MWCNT	90±1	1,132±0,002

\*Abrasão – Perda relativa de Volume

A formulação que apresentou melhor equilíbrio entre as propriedades de resistência ao rasgo e abrasão foi a NR 60 NF, com 60 phr de negro de fumo, seguida pelas duas formulações de NR MWCNT. No entanto, estas duas últimas apresentam grande dificuldade no processamento de moldagem devido à alta viscosidade conferida ao composto pelos MWCNT`s. Nestas últimas composições também houve um aumento na rigidez do material quando da adição de MWCNT, o que evidencia a relação entre a pior processabilidade (ML), maior MH, tanto para sistemas baseados apenas em NR quanto para as blendas de MWCNT. Aumento de densidade e velocidade de vulcanização também podem indicar uma maior densidade de reticulação

#### 5.1.5. Resistência ao envelhecimento térmico

Poucas variações nas propriedades de envelhecimento térmico (Tabela 5.6) foram observadas entre os compostos avaliados. As composições com sílica apresentaram incremento no alongamento e tensão na ruptura, que podem ser justificados por uma cura residual nestes compostos com sílica (o que pode acontecer quando o processo de silanização não é 100% eficiente). Os valores apresentados consideram uma amostra antes e uma depois.

Tabela 5.6. Variação das propriedades físico-mecânicas antes e após envelhecimento na câmara 70°C por 70h (todos os valores apresentados abaixo são em percentuais, quando negativo, se trata do valor em porcentagem de decréscimo).

Compostos	Dureza Shore A, pontos	Alongamento na ruptura, %	Tensão na ruptura, %
NR 60 NF	6	5	6
NR SIL	3	Zero	<b>11</b>
NR MWCNT	4	-5	4
NR/EPDM 60 NF	4	-3	4
NR/EPDM SIL	3	<b>21</b>	<b>8</b>
NR/EPDM MWCNT	4	-9	Zero

### 5.1.6. Resistência ao ozônio

O teste de resistência ao ozônio tem sido correlacionado com a resistência dos materiais à exposição ao ambiente externo ou intemperismo, quanto mais resistentes ao ozônio forem os materiais, mais resistentes eles serão no envelhecimento devido à ação do intemperismo sobre a peça, propriedade fundamental para artefatos que ficam expostos diretamente ao ambiente externo.

A Figura 5.2 mostra uma comparação entre o perfil de fendilhamento das amostras, submetidas à mesma atmosfera de ozônio. Como esperado que, devido a sua estrutura química, as amostras com EPDM foram mais resistentes ao ozônio, não apresentando nenhum fendilhamento após o término do tempo de exposição. Já as amostras com 100% de borracha natural (NR 60NF, NR SIL e NR MWCNT) apresentaram fendilhamento desde as primeiras 24 h de ensaio (total de 72 h). É interessante notar que as amostras de NR reforçadas com sílica apresentaram fendilhamento menos severo do que as demais, o que pode evidenciar um fator protetor da sílica. Além disso, o perfil de fendilhamento das amostras NR 60 NF e NR MWCNT são notoriamente diferentes.

Em todas as amostras é possível observar manchas na superfície dos corpos de prova vulcanizados, as quais ocorreram provavelmente devido à migração da cera antiozonante inserida no composto, que forma uma barreira física de proteção na superfície da peça.

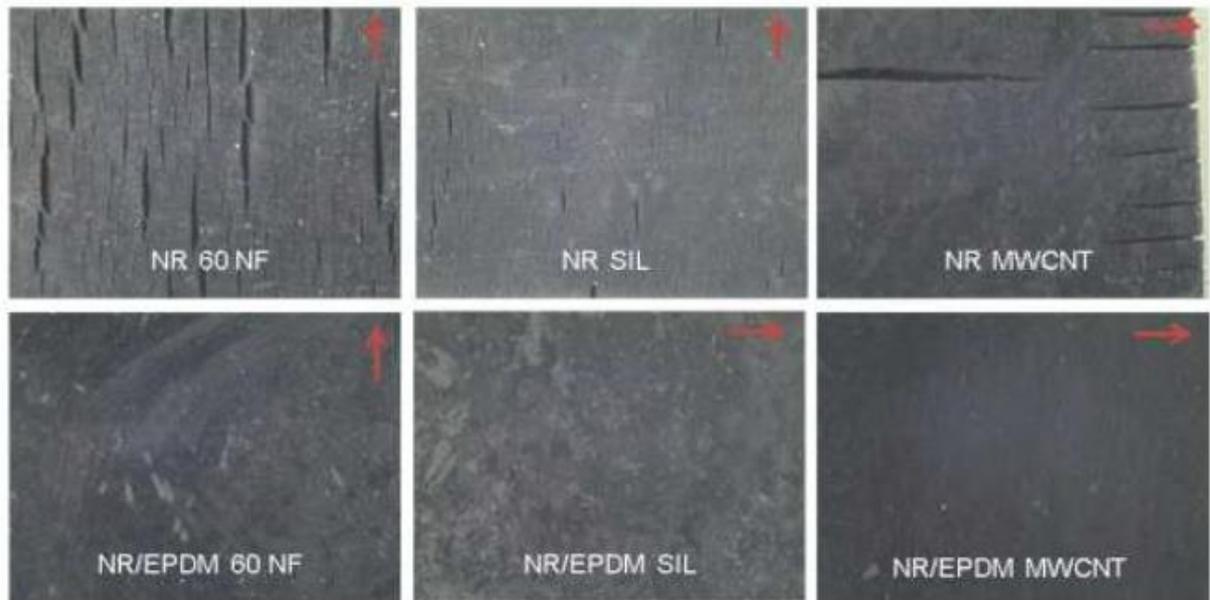


Figura 5.2. Amostras expostas ao ozônio após 72 h de ensaio. A seta vermelha indica o sentido de laminação do composto.

#### 5.1.7. Resultado da Análise dinâmico-mecânica (DMA)

As curvas das figuras 5.3, e figura 5.4 ilustram as análises dinâmico-mecânica dos três materiais selecionados. Os resultados são das 3 amostras em função da temperatura, considerando o modulo de armazenamento, modulo de perda e tangente delta.

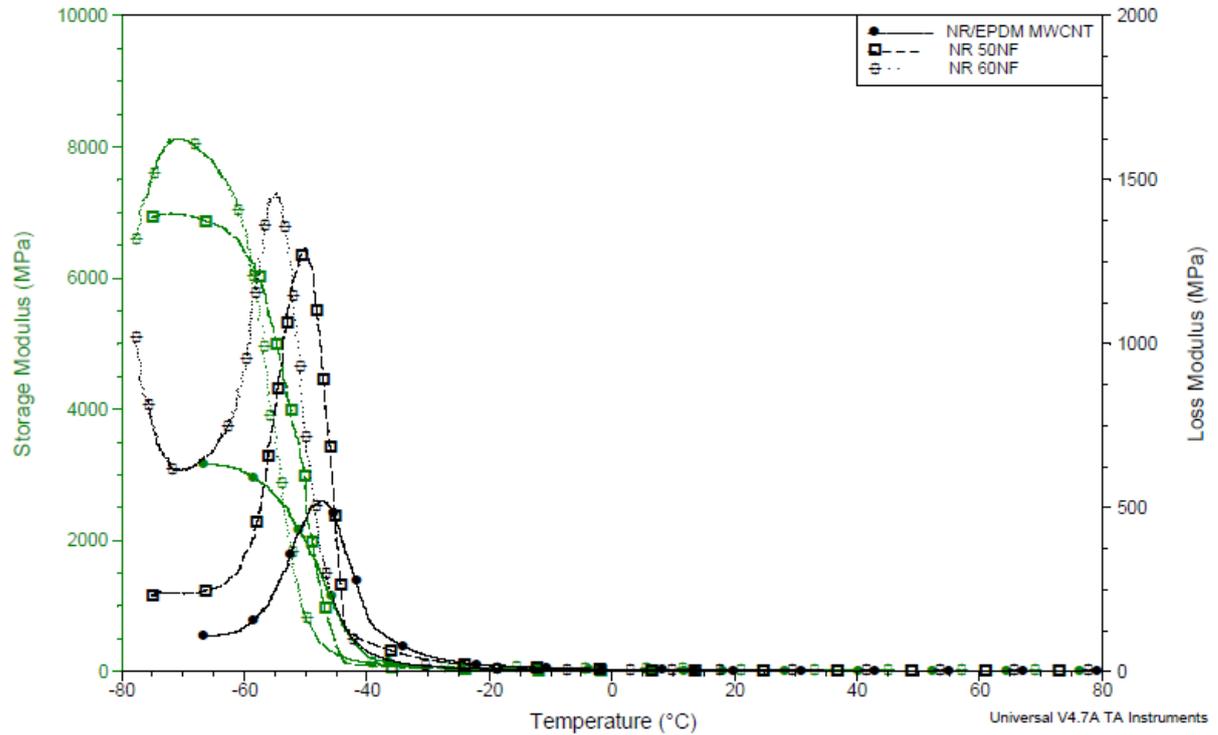


Figura 5.3. Módulo de armazenamento e Módulo de perda em função da temperatura

De acordo com a figura 5.3, nas curvas em verde é possível observar que em termos de capacidade de armazenagem de energia, as amostras com composição de somente borracha natural em sua matriz apresentaram uma capacidade de armazenamento maior em relação à amostra que contém mistura com EPDM.

A curva de perda das três amostras (em preto) é possível visualizar que as duas amostras com matriz 100% de borracha natural tiveram uma capacidade maior de perda e dissipação de energia. As amostras apresentaram somente uma diferença de temperatura, porém para a aplicabilidade dos materiais esse valor não afeta a performance.

Já a figura 5.4 apresenta a razão entre o módulo de perda e de armazenagem, no caso o tangente  $\delta$  para as amostras de NR50NF, NR/EPDM MWCNT e NR60NF.

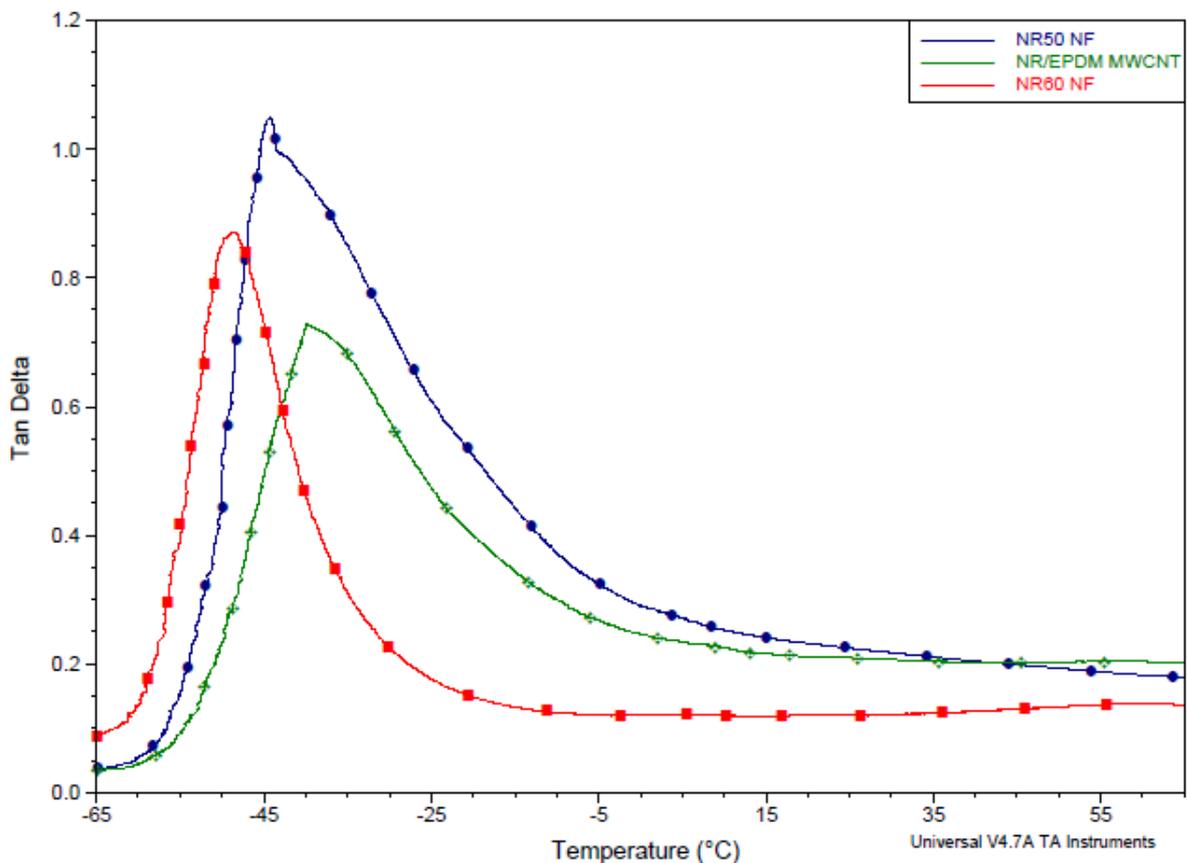


Figura 5.4. Tangente  $\delta$  das amostras em função da temperatura.

De acordo com o gráfico (figura 5.4) é possível observar que a maior intensidade no pico de  $\tan \delta$  aconteceu na amostra NR50 NF, cerca de 1,1 e  $T_g = -44,2^\circ\text{C}$  contra 0,88 da amostra de NR60 NF, com  $T_g = -48,73^\circ\text{C}$  e menor valor de 0,74 para a amostra de NR/EPDM MWCNT, com  $T_g = -39,7^\circ\text{C}$ . Ou seja, foi a amostra de NR50 NF foi a que apresentou maior diferença entre as respostas elástica e viscosa, onde a resposta viscosa predomina à elástica.

Cabe salientar que apenas um pico é observado para NR/EPDM MWCNT, o que indica uma possível boa miscibilidade entre NR e EPDM, com  $T_g$  única, deslocada em relação às  $T_g$ s dos polímeros originais. O baixo valor de  $\tan \delta$  na  $T_g$  na amostra de NR/EPDM MWCNT está vinculado ao reforço que a adição de nanotubos de carbono trouxeram ao material. De fato, a maior rigidez da blenda NR/EPDM aditivada com nanotubos de carbono, quando comparada aos demais

materiais foi observada nos ensaios de viscosidade Mooney e curva reométrica, conforme apresentado nas tabelas 5.1 e 5.2 e na figura 5.2.

Ainda assim, é importante observar que a composição NR/EPDM MWCNT é que apresenta o maior amortecimento dentre os três materiais, se for analisada a região de temperaturas mais elevadas, o que dependendo da temperatura de aplicabilidade pode melhorar a performance com essa composição.

### 5.1.8. Microscopia de força atômica (AFM)

As figuras 5.5., 5.6., e 5.7., apresentam as imagens obtidas nas análises de microscopia força atômica (AFM) dos três materiais selecionados.

Na figura 5.6 ao lado esquerdo é possível ver a morfologia em duas dimensões para a amostra de NR50NF, onde foi possível visualizar alguns pontos de distribuição não perfeita de material (carga) na matriz, com alguns pontos de concentração como pode ser melhor identificado nos picos na imagem da direita.

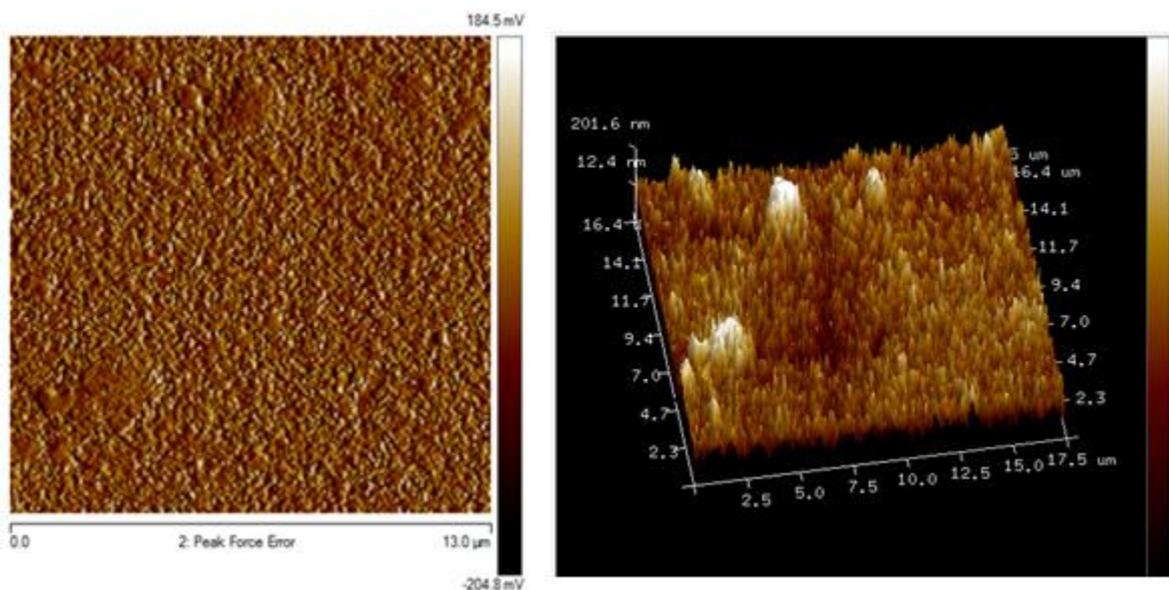


Figura 5.5. Análise de AFM da amostra de NR50, a esquerda imagem 2D, e a direita a imagem 3D

Na figura 5.6 ao lado esquerdo é possível ver a morfologia em duas dimensões para a amostra de NR60NF, onde foi possível visualizar um ponto de concentração maior como pode ser visto também na imagem da direita em terceira dimensão, porém visualmente é possível ver uma distribuição mais uniforme em comparação com a amostra de NR50NF.

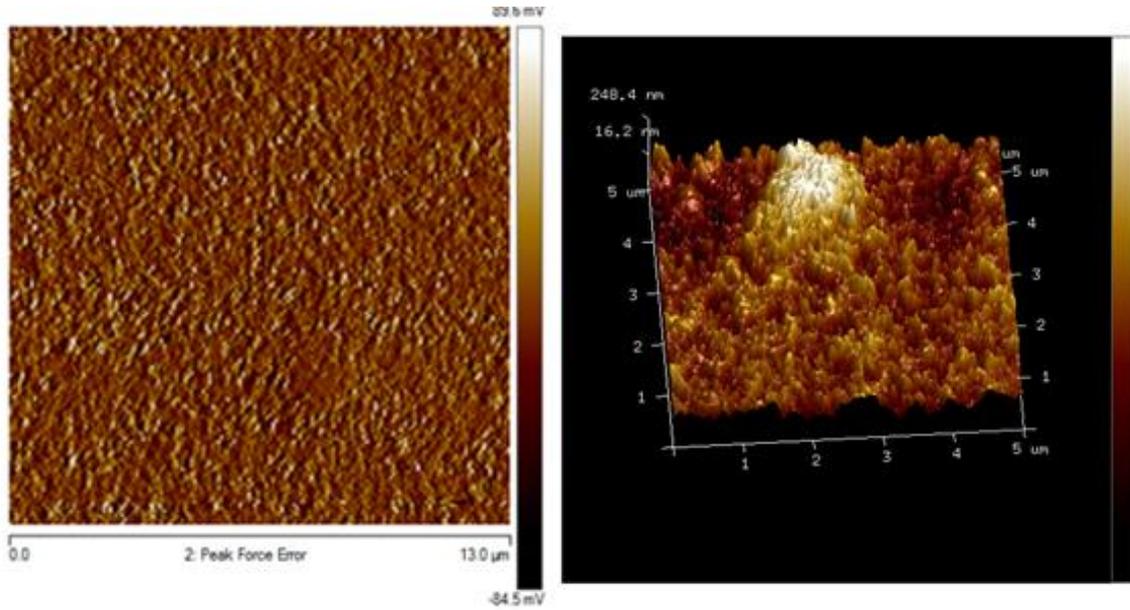


Figura 5.6. Análise de AFM da amostra de NR60, a esquerda imagem 2D, e a direita a imagem 3D

Na figura 5.7 ao lado esquerdo é possível ver a morfologia em duas dimensões para a amostra de NR/EPDM/MWCNT, onde visualmente apresentou uma distribuição mais uniforme do negro de fumo na matriz. O que pode ser muito bem identificado foi o posicionamento dos nanotubos de carbono na área superficial, bem como os picos de altura do mesmo visualizados na imagem em terceira dimensão do lado direito da figura.

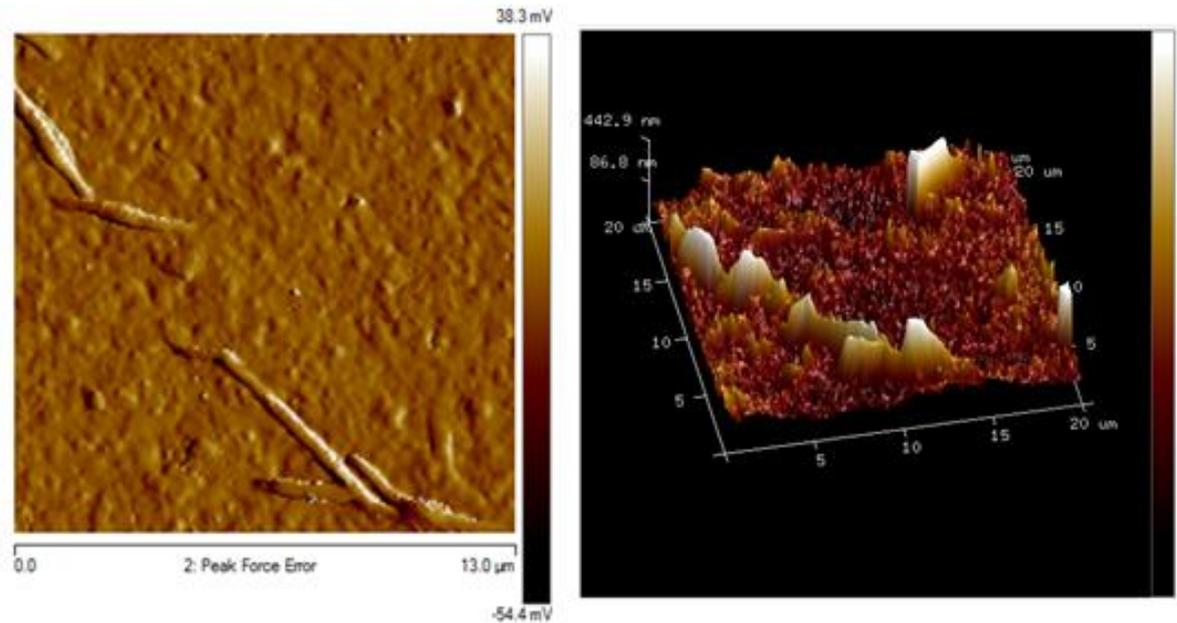


Figura 5.7. Análise de AFM da amostra de NR/EPDM/MWCNT, a esquerda imagem 2D, e a direita a imagem 3D.

## 5.2. Resultados dos estudos de caso da simulação numérica computacional

Neste tópico serão apresentados os resultados das simulações computacionais realizadas com base nos quatro estudos de caso propostos anteriormente, e nas três composições escolhidas.

### 5.2.1. Estudo de Caso 1

O primeiro estudo foi baseado no conhecimento empírico de que cada componente pode vir a sofrer uma carga de 200 N (20 kgf), em uma região localizada ao centro da crista do dente, no sentido radial ao cilindro de trilhagem. Por se tratar de carregamento sem forma definida, considerou-se um indentador cilíndrico de raio 25 mm atuando sobre o dente da trilha (Figura 5.8) deslocando-se 4,5 mm no sentido descendente (Figura 5.9). Utilizou-se um coeficiente de atrito de 0,3 na análise.

Foram avaliadas a força de reação radial e a tensão principal máxima resultante contra o deslocamento radial do indentedor.

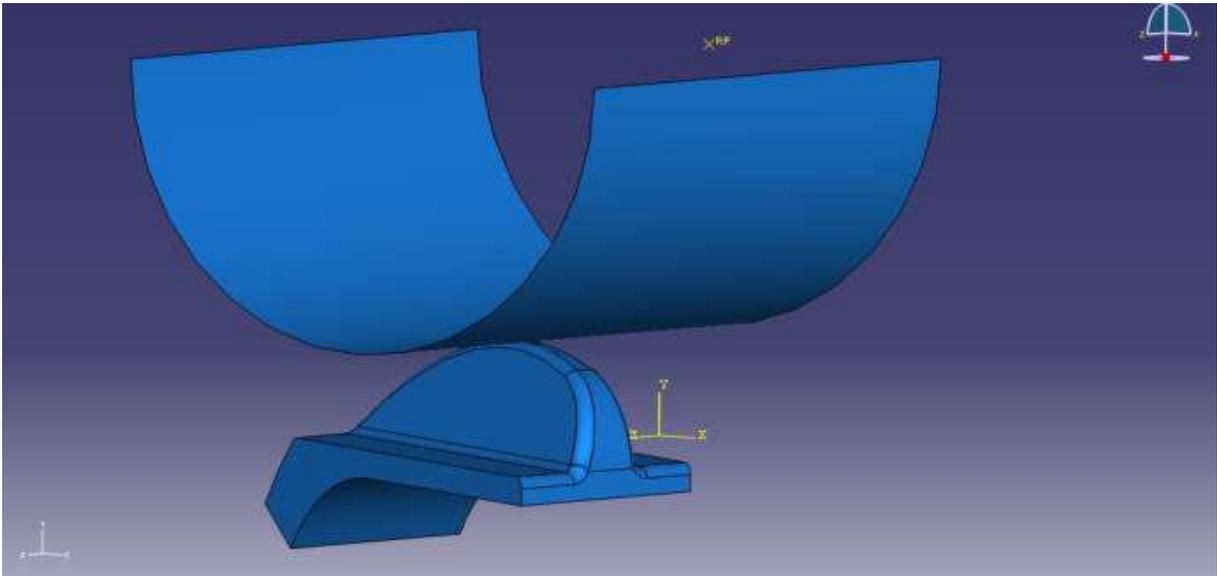


Figura 5.8. Modelo do indentedor raio 25 mm atuando no sentido radial (eixo y).

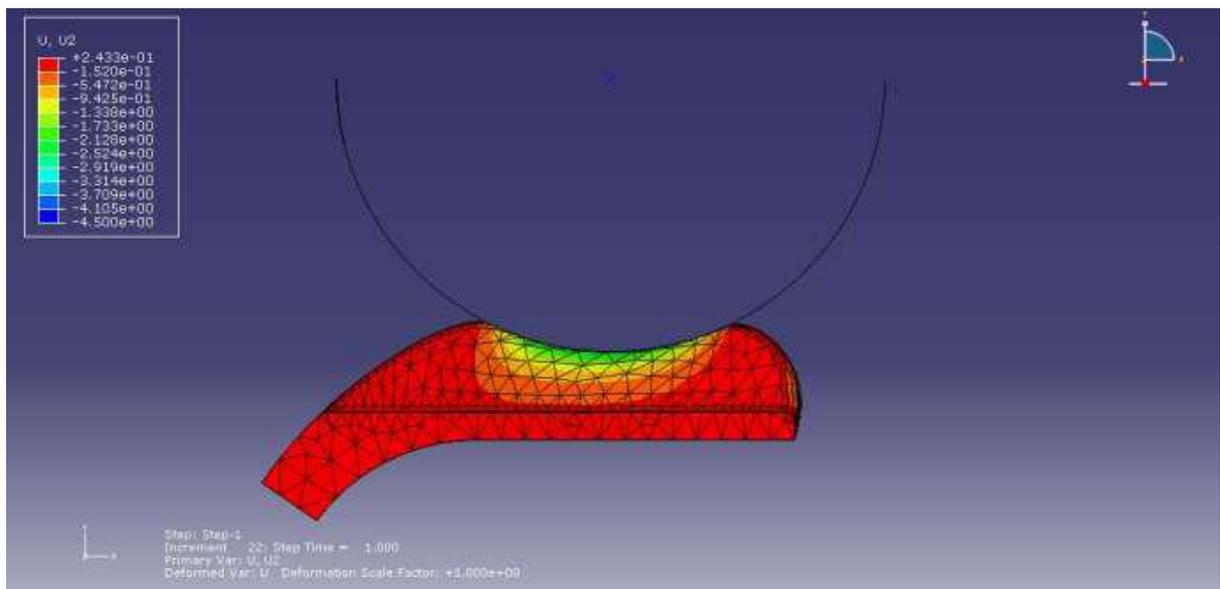


Figura 5.9. Deslocamento final de 4,5 mm no eixo y para o composto NR 60 NF.

A Figura 5.10 apresenta as tensões principais máximas no momento final da simulação da composição NR60NF. A Tabela 5.10 apresenta os valores da Tensão Principal Máxima para os compostos analisados e seus valores de referência do limite de ruptura e do módulo a 100% de deformação.

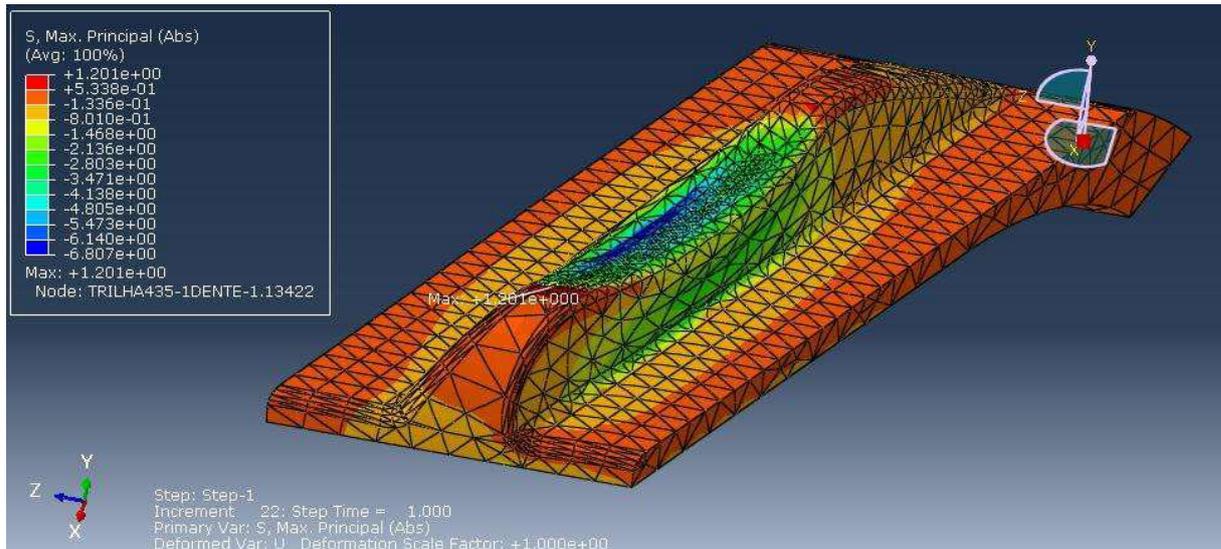


Figura 5.10. Tensões Principais Máximas no momento final para o composto NR 60 NF.

Tabela 5.10. Resultado estudo de caso 1

	NR 50 NF	NR 60 NF	NR/EPDM MWCNT
Tensão Principal Máxima, MPa	1,1	1,2	1,0
Limite de ruptura, MPa	27,9	23,8	18,8
Módulo a 100%, MPa	2,6	3,6	5,0

Pelos resultados da Tabela 5.10, observa-se que para todas as composições, a tensão máxima ficou abaixo do limite de ruptura e do módulo a 100%, indicando que os compostos suportam a solicitação imposta.

A Figura 5.11 apresenta o gráfico da força de reação em função do deslocamento aplicado para os compostos analisados. Observa-se que todas as composições foram analisadas acima dos 200 N previstos, em apenas um dente da trilha.

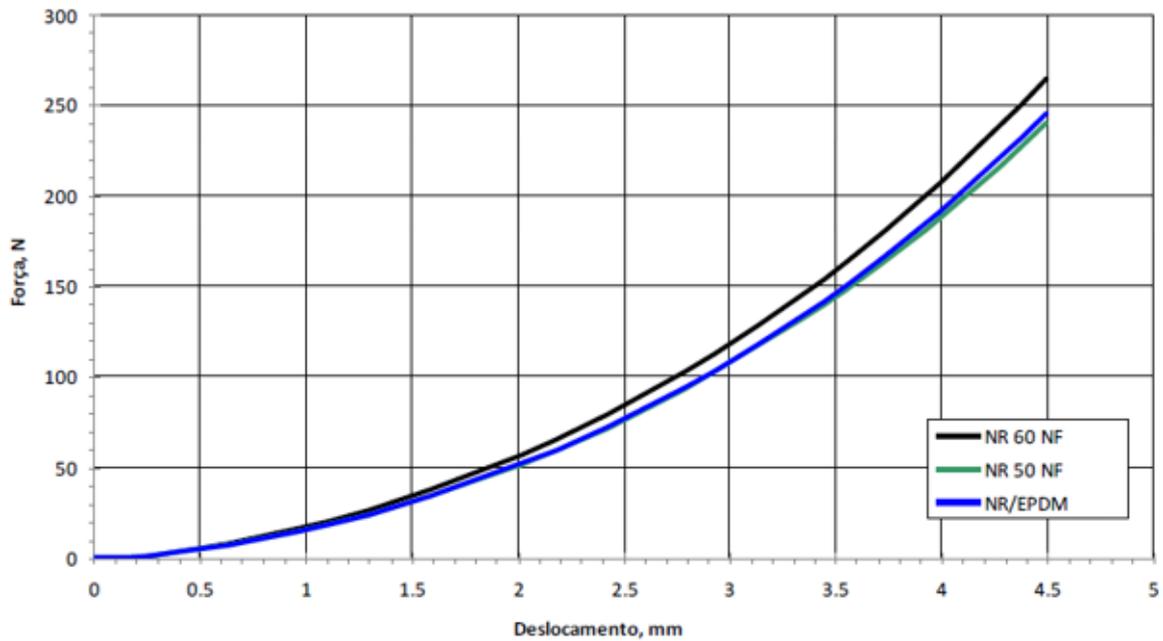


Figura 5.11. Força de reação em função do deslocamento aplicado.

### 5.2.2. Estudo de Caso 2

O segundo estudo foi baseado no movimento de trilhagem do cilindro. Durante o giro de trilhagem, a trilha arrasta o material colhido podendo gerar uma indeterminada compactação deste material. Portanto, foi idealizado o movimento relativo tangencial de um indentador cilíndrico de raio 25 mm (Figura 5.12) contra o dente da trilha, causando uma deformação radial de 5 mm sobre o dente. Aplicou-se um deslocamento até o ponto de 5mm de deformação, no sentido do eixo x do desenho da Figura 5.13.

Foram avaliadas a força de reação tangencial e a tensão principal máxima resultante contra o deslocamento tangencial do indentador.

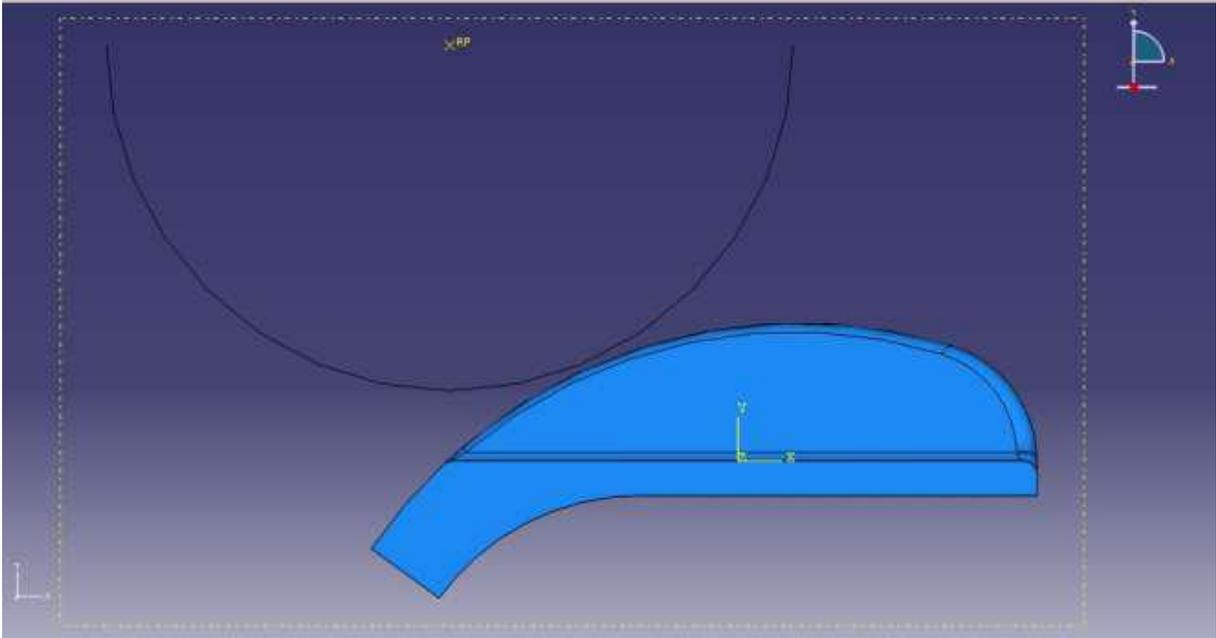


Figura 5.12. Modelo do indentador raio 25 mm atuando no sentido tangencial (eixo x).

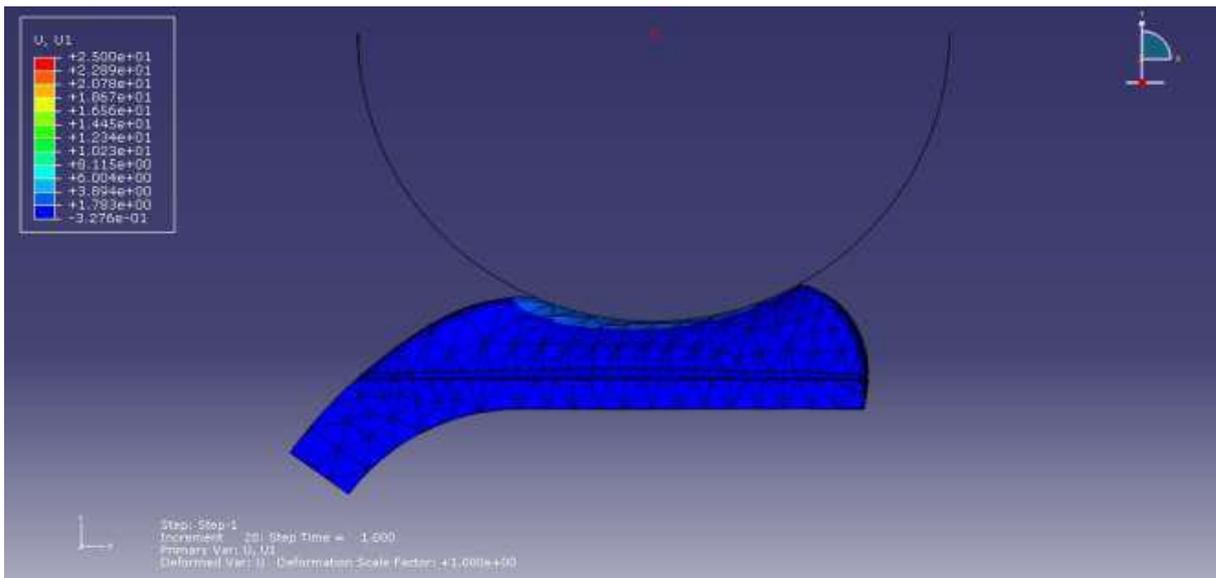


Figura 5.13. Deslocamento final no eixo x para o composto NR 60 NF.

A Figura 5.14 apresenta as tensões principais máximas no momento final da simulação para o composto NR60NF. A Tabela 5.11 apresenta os valores máximos da Tensão Principal Máxima para os compostos analisados e seus valores de referência do limite de ruptura e do módulo a 100% de deformação.

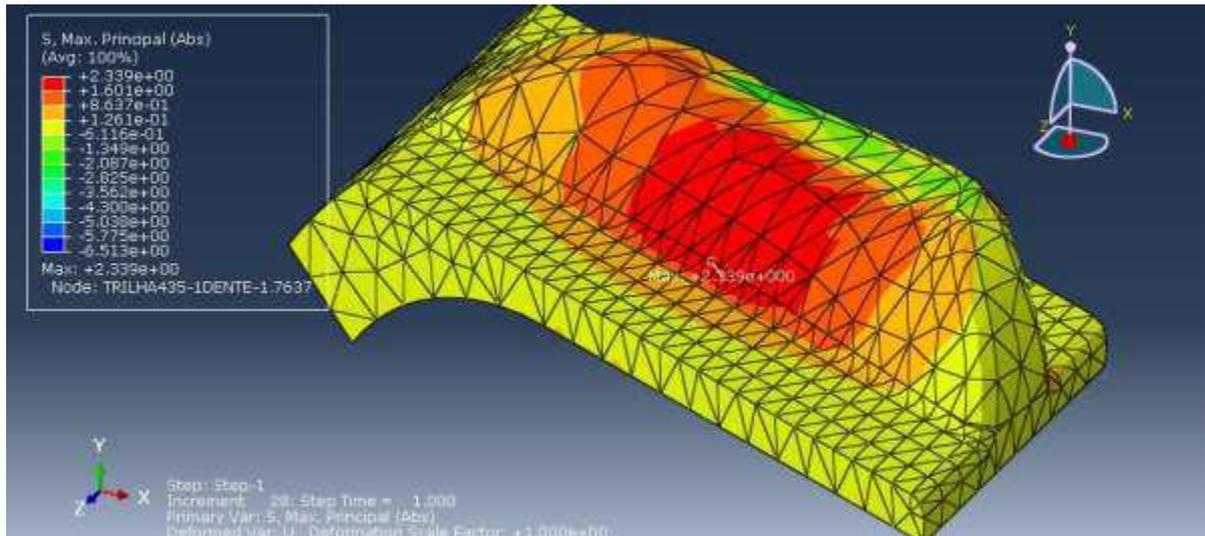


Figura 5.14. Tensões Principais Máximas no momento final para o composto NR 60 NF.

Tabela 5.11. Resultados do estudo de caso 2

	NR 50 NF	NR 60 NF	NR/EPDM MWCNT
Tensão Principal Máxima, Mpa	2,1	2,3	2,1
Limite de ruptura, MPa	27,9	23,8	18,8
Módulo a 100%, MPa	2,6	3,6	5,0

Pelos resultados da Tabela 5.11, observa-se que para todos os compostos, a tensão máxima ficou abaixo do limite de ruptura e do módulo a 100%, indicando que estes suportam a solicitação imposta.

A Figura 5.15 apresenta o gráfico da força de reação tangencial em função do deslocamento do indentador para os compostos analisados. Esta força de reação é dependente do coeficiente de atrito adotado na análise, e percebe-se que a força diminui o deslocamento que é dependente da geometria do modelo. A Figura 5.16 apresenta o gráfico da força de reação radial em função do deslocamento do indentador.

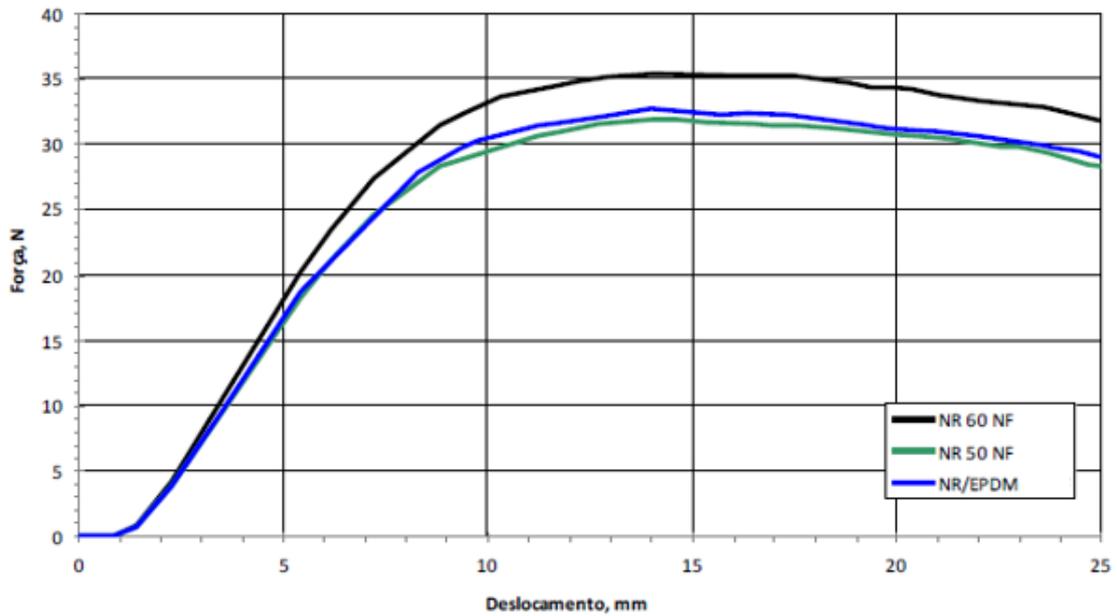


Figura 5.15. Força de reação tangencial em função do deslocamento do indentador.

Na Figura 5.15 a queda apresentada entre o intervalo de 15mm e 25mm é justamente motivada pelo movimento do modelo linear sobre a superfície da do dente não-linear.

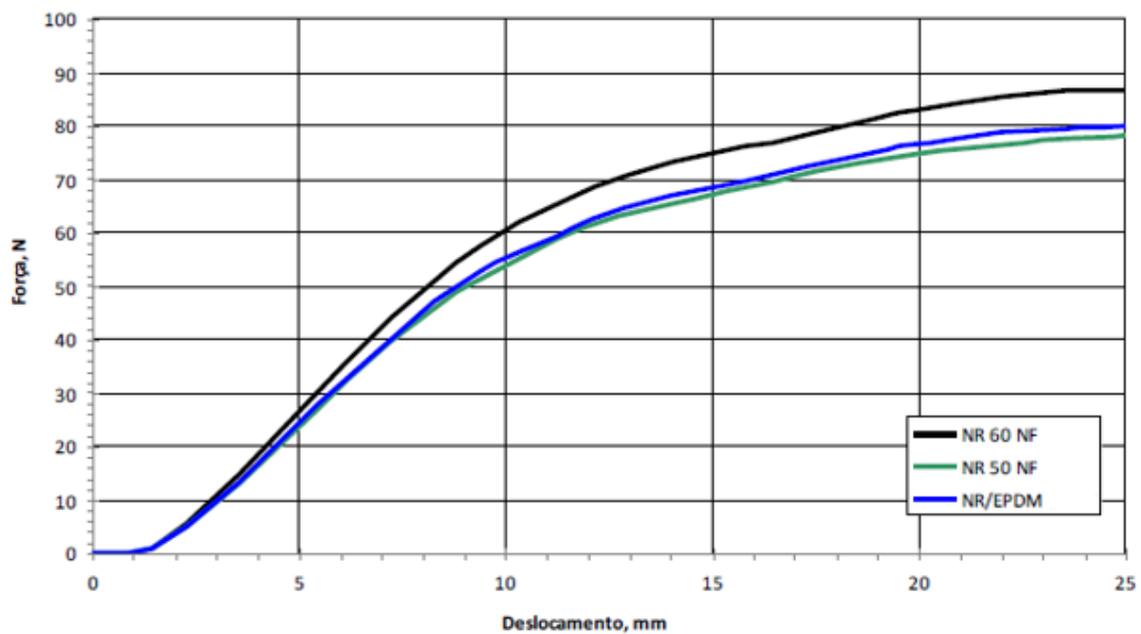


Figura 5.16. Força de reação radial em função do deslocamento do indentador.

### 5.2.3. Estudo de Caso 3

Foi avaliado o comportamento do dente contra forças distribuídas de forma transversal, totalizando 100 N em ambas as faces esquerda e direita, independentemente, conforme Figura 5.17. Foram avaliadas a tensão principal máxima e os deslocamentos resultantes do carregamento aplicado.

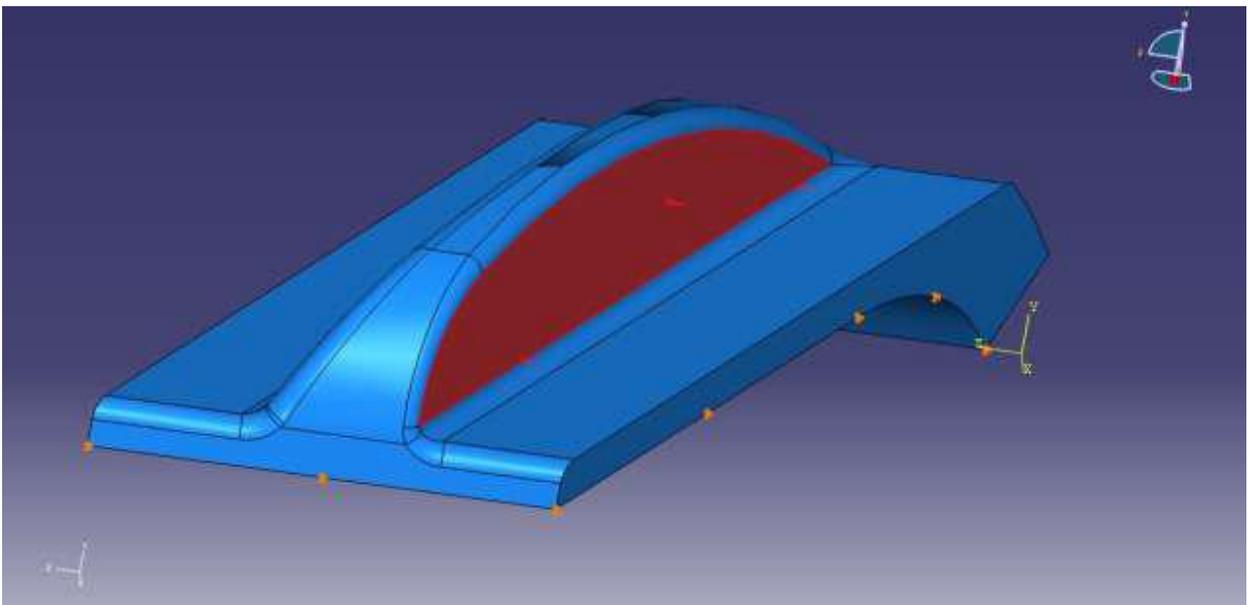


Figura 5.17. Força de 100N distribuída em uma das faces.

A Figura 5.18 apresenta o deslocamento no eixo z no momento final da simulação da composição de NR60NF. A Tabela 5.3 apresenta os valores de deslocamento máximo no eixo z para as composições pré-selecionadas.

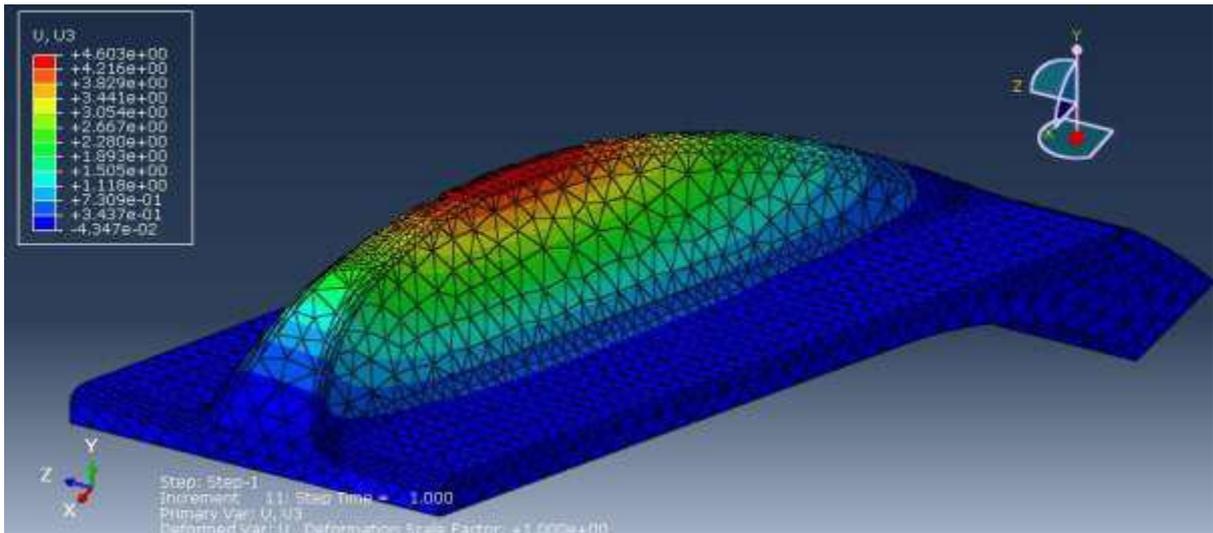


Figura 5.18. Deslocamento no eixo z final para a composição de NR 60 NF.

A Figura 5.19 apresenta as tensões principais máximas no momento final da simulação para a composição NR60NF. A Tabela 5.12 apresenta os valores máximos da Tensão Principal Máxima para as composições analisadas e os valores de referência do limite de ruptura e do módulo a 100% de deformação de cada composição.

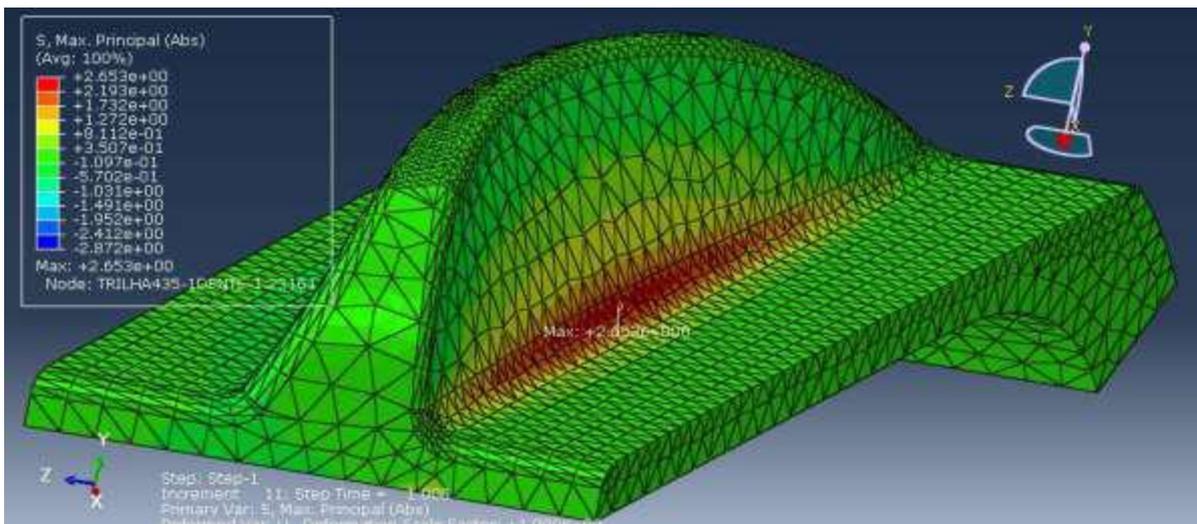


Figura 5.19. Tensões Principais Máximas no momento final para a composição NR 60 NF.

Tabela 5.12. Resultados estudo de caso 3 - força a direita.

	NR 50 NF	NR 60 NF	NR/EPDM MWCNT
Tensão Principal Máxima, Mpa	2,7	2,6	2,7
Limite de ruptura, MPa	27,9	23,8	17
Módulo a 100%, MPa	2,6	3,6	5,0
Deslocamento, mm	5,1	4,6	5,0

Pelos resultados da Tabela 5.12, observa-se que para todas as composições a tensão máxima ficou abaixo do limite de ruptura e abaixo do módulo a 100%, indicando que os compostos suportam a solicitação imposta. Já a Figura 5.20 mostra a aplicação de força na face contrária.

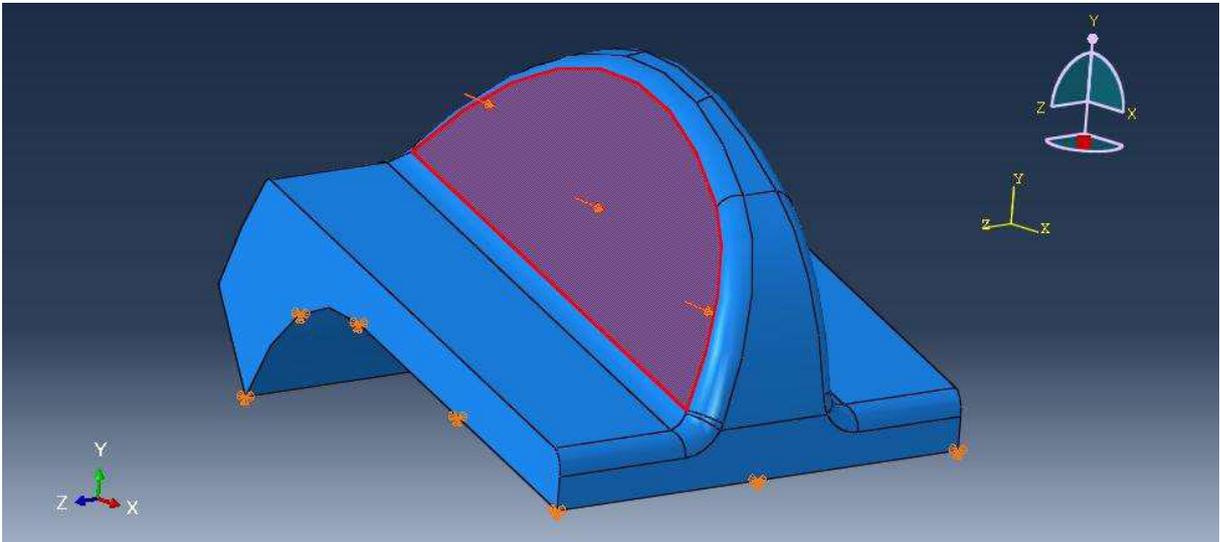


Figura 5.20. Força de 100 N distribuída em na outra face

A Figura 5.21 apresenta o deslocamento no eixo z no momento final da simulação de um dos compostos analisados. A Tabela 5.5 apresenta os valores de deslocamento máximo no eixo z para os compostos analisados.

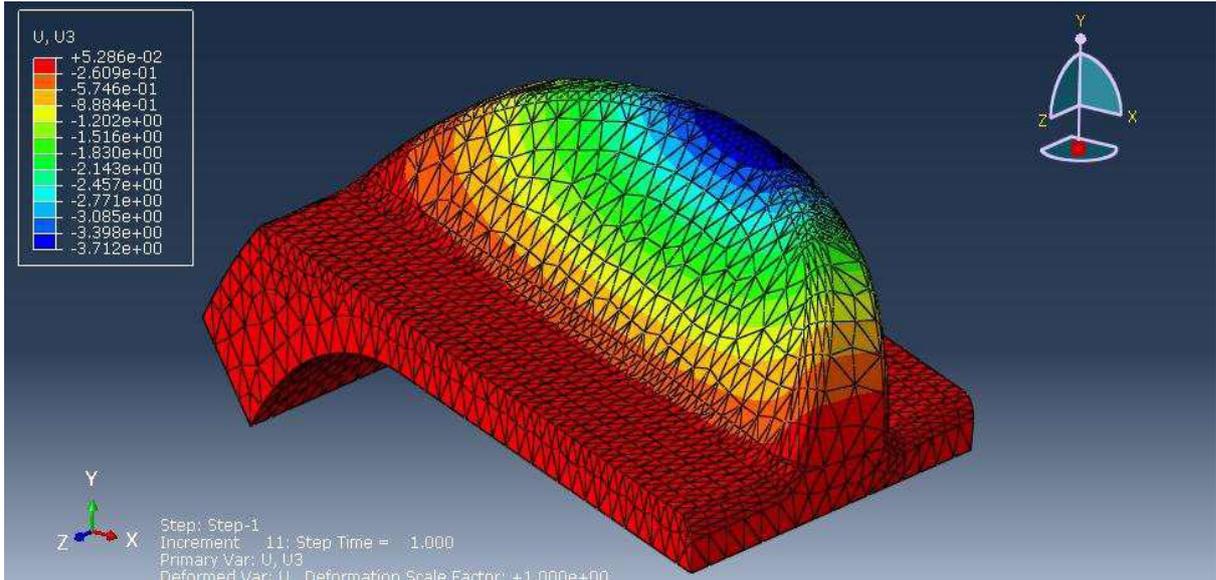


Figura 5.21. Deslocamento no eixo z final para a composição NR 60 NF.

A Figura 5.22 apresenta as tensões máximas no momento final da simulação da composição NR60NF. A Tabela 5.13 apresenta os valores máximos da Tensão Principal Máxima para os compostos analisados e os valores de referência do limite de ruptura e do módulo a 100% de deformação de cada composição.

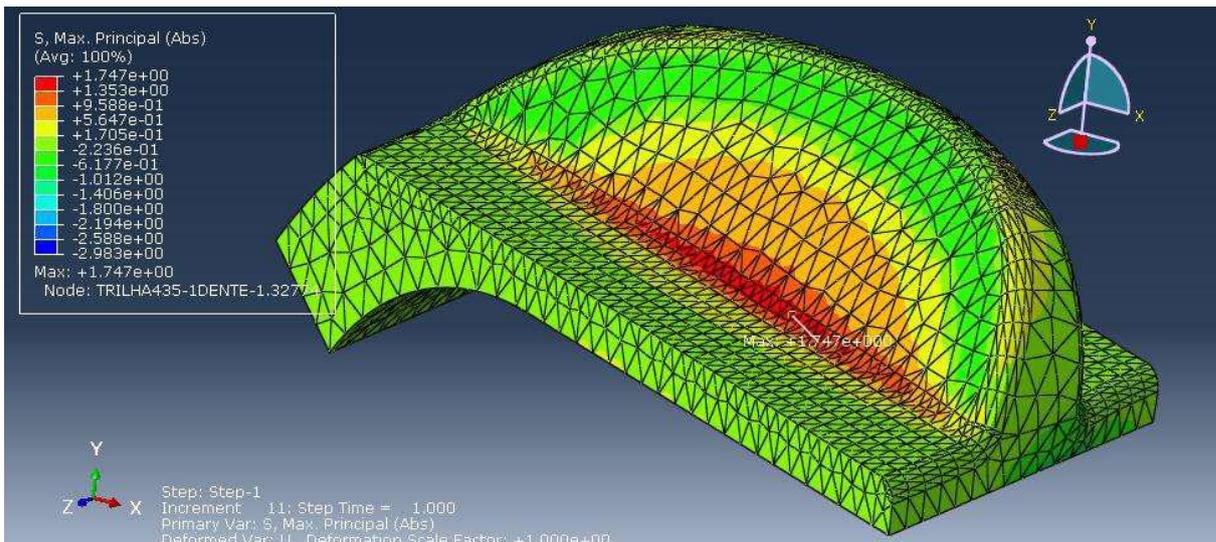


Figura 5.22. Tensões Principais Máximas no momento final para a composição NR 60 NF.

Tabela 5.13. Resultados do estudo de caso 3 - força a esquerda.

	NR 50 NF	NR 60 NF	NR/EPDM MWCNT
Tensão Principal Máxima, MPa	1,7	1,8	1,7
Limite de ruptura, MPa	27,9	23,8	17
Módulo a 100%, MPa	2,6	3,6	5,0
Deslocamento, mm	4,1	3,7	4,1

Pelos resultados da Tabela 5.13, observa-se que, para todas as composições, a tensão máxima ficou abaixo do limite de ruptura e do módulo a 100%, indicando que as composições suportam a solicitação imposta.

#### 5.2.4. Estudo de Caso 4

O problema foi modelado como sendo o grão um indentador atuando contra a barra de trilha no sentido radial do cilindro de trilhagem, na região de menor folga entre a trilha e o côncavo, ou seja, no topo do dente da amostra, conforme Figura 5.23. Foi aplicado um deslocamento de 6 mm no indentador, conforme Figura 5.24, e utilizou-se um coeficiente de atrito de 0,3 na análise.

Foram avaliadas a força de reação radial e as tensões principais máximas resultantes, do deslocamento radial do indentador. A Figura 5.23 ilustra o início da aplicação do carregamento e, na Figura 5.24, vê-se o instante final.

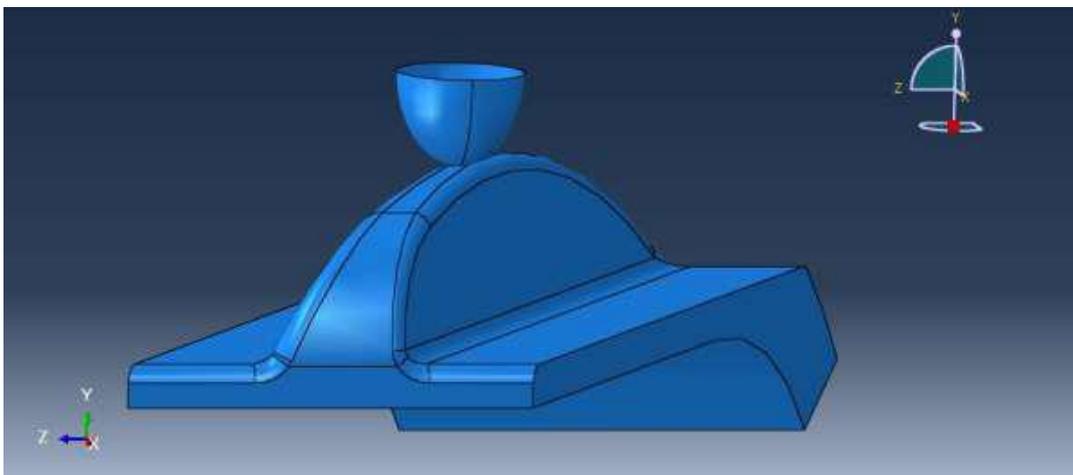


Figura 5.23. Modelo do indentador tipo grão atuando no sentido radial (eixo y).

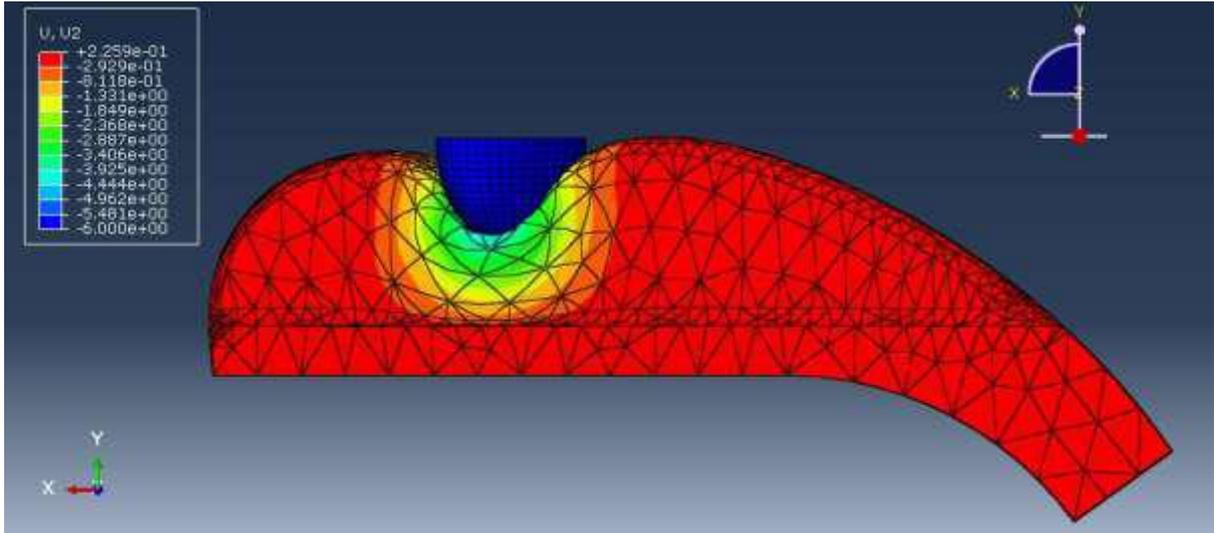


Figura 5.24. Deslocamento final no eixo y para a composição de NR 60 NF.

A Figura 5.25 apresenta as tensões principais máximas no momento final da simulação da composição NR60NF. A Tabela 5.14 apresenta os valores máximos da Tensão Principal Máxima para os compostos analisados e os valores de referência do limite de ruptura e do módulo a 100% de deformação de cada composto.

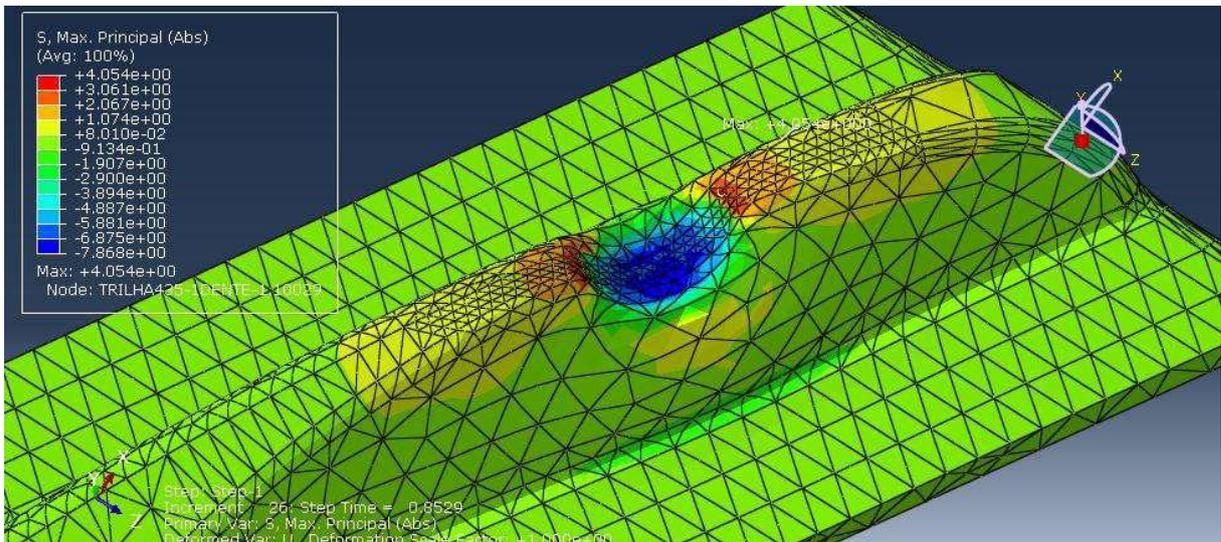


Figura 5.25. Tensões principais máximas no momento final para a composição de NR 60 NF.

Tabela 5.14. Resultados do estudo de caso 4

	NR 50 NF	NR 60 NF	NR/EPDM MWCNT
Tensão Principal Máxima, MPa	4,0	4,0	3,8
Limite de ruptura, MPa	27,9	23,8	18,8
Módulo a 100%, MPa	2,6	3,6	5

Pelos resultados da Tabela 5.14, observa-se que para todas as composições, a tensão máxima ficou abaixo do limite de ruptura indicando que os compostos suportam a solicitação imposta.

A Figura 5.26 apresenta o gráfico da força de reação em função do deslocamento aplicado para as composições analisadas. Observa-se que, para a condição imposta, a força de reação dos compostos analisados fica abaixo de 200 N, indicado pela literatura (França et al.(2007) como sendo o limite de força de compressão máxima para o grão de soja em condição de colheita.

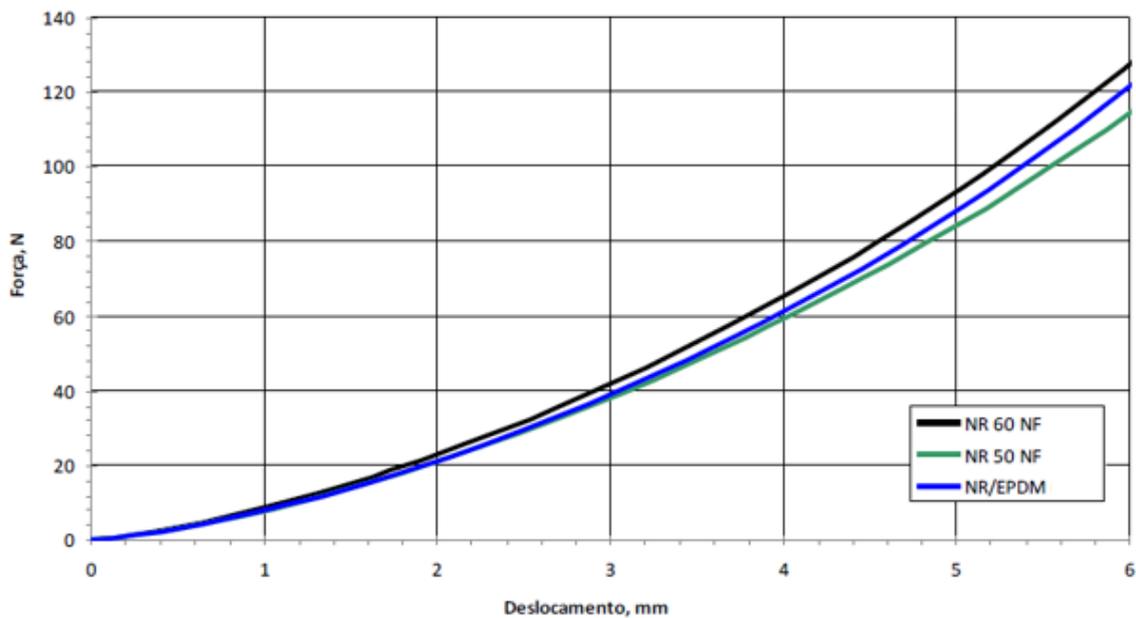


Figura 5.26. Força de reação em função do deslocamento aplicado.

Em geral, todas as composições submetidas às análises computacionais citadas acima, suportaram as cargas de tensão aplicada e todos apresentaram as respectivas deformações nos eixos x, y e z, considerando como critério de falha a tensão principal máxima. Estas deformações apresentadas, principalmente no estudo 4, evidenciam que os materiais em estudo irão absorver energia em algum instante de tempo de qualquer elemento que transitar no sistema de trilha da colheitadeira, que no caso poderá vir a ser as sementes/grão.

### **5.3. Elaboração do Lote piloto**

#### **5.3.1. Seleção e elaboração dos compostos (Metodologia)**

O objetivo principal desta etapa foi elaborar os compostos previamente selecionados em quantidade suficiente para permitir a vulcanização de 48 trilhas para a aplicação dois testes de campo. Os materiais escolhidos com base nos dados obtidos dos testes laboratoriais são os compostos NR 50NF, NR 60NF e NR/EPDM MWCNT, já apresentadas anteriormente em alguns testes. Para dar suporte a esse objetivo, foram executadas as atividades de elaboração e caracterização das composições elastoméricas selecionados.

As composições de NR 50NF e NR 60NF foram elaborados em Banbury de laboratório, da marca Projetek, com capacidade de 2500 cm<sup>3</sup>. Os parâmetros de processo e a ordem de adição dos ingredientes estão descritos nas Tabelas 5.15 e 5.16, respectivamente.

Tabela 5.15. Parâmetros de processo utilizados no Banbury para os compostos NR 50 NF e NR 60 NF

Rotação	40 rpm
Temperatura inicial das misturas	50°C
Temperatura final das misturas	120 -133°C
Fator de enchimento do Banbury	0,75

Tabela 5.16. Ordem de adição no Banbury para os compostos NR 50 NF e NR 60 NF

Ordem de adição	Tempo (min)	
	NR 50NF	NR 60NF
NR plastificada	1	1
Óxido de zinco + ácido esteárico	1	1
½ negro de fumo	2	2
TMQ + 6PPD + cera + óleo	1	1
½ negro de fumo	4	5

Foram elaboradas 4 (quatro) bateladas de cada composto, totalizando aproximadamente 8 kg (para NR60NF e NR50NF). As 4 (quatro) bateladas foram homogeneizadas em misturador aberto durante o processo de aceleração, onde foram adicionados o agente de cura e aceleradores, evitando-se uma plastificação excessiva dos mesmos. Os compostos já acelerados foram laminados com uma espessura de 15 mm e, posteriormente, cortados em tiras com dimensões aproximadas de 410 mm X 25 mm.

A elaboração do composto NR/EPDM MWCNT foi realizada em um misturador tipo Haake Rheomix 3000p utilizando-se um rotor tipo Banbury. Foi utilizado este tipo de misturador devido a menor quantidade necessária de composto para a elaboração de apenas seis trilhas (Foram definidas seis unidades desta composição por questões financeiras). Esta preparação envolveu duas etapas de mistura, a incorporação dos ingredientes na borracha plastificada e a adição do

sistema de cura. Os parâmetros de processo para a primeira etapa de mistura dos ingredientes estão discriminados nas Tabelas 5.17 e 5.18, enquanto a etapa de adição do sistema de cura está descrita nas Tabelas 5.19 e 5.20.

Tabela 5.17. Parâmetros de processo utilizados no misturador Banbury para as composições MWCNT

Rotação	60 rpm
Temperatura inicial das misturas	60°C
Temperatura final das misturas	121 -127°C
Fator de enchimento do Haake	0,70

Tabela 5.18. Ordem de adição para as composições MWCNT

<b>Ordem de adição</b>	<b>Tempo (min)</b>
NR plastificada	1
Óxido de zinco + ácido esteárico	1
2/3 nanotubos de carbono	1
1/3 nanotubos de carbono	1
½ negro de fumo	2
TMQ + 6PPD + cera	1
½ negro de fumo	2
Óleo parafínico	1

Foram elaboradas 8 (oito) bateladas deste composto, totalizando aproximadamente 2,4kg, os quais foram homogeneizados em misturador aberto de laboratório, evitando-se uma plastificação excessiva dos mesmos. Os compostos homogeneizados foram laminados e cortados na mesmas dimensões e espessuras citadas anteriormente.

Tabela 5.19. Parâmetros de processo para preparação da primeira etapa do composto NR/EPDM MWCNT

Rotação	60 rpm
Temperatura inicial da mistura	50°C
Temperatura final da mistura	90°C
Fator de enchimento do Haake	0,70

### 5.3.2. Vulcanização das amostras

As composições preparadas em forma de tiras foram sobrepostos aos insertos metálicos já preparados com primer e adesivo (Figura 5.29) e, então, vulcanizados em um molde conforme Figura 5.19, utilizando-se o processo de moldagem por compressão em uma prensa hidráulica conforme parâmetros indicados na Tabela 5.20.

Tabela 5.20. Parâmetros de cura das amostras em formato final

Amostra	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Pressão manométrica (kgf/cm <sup>2</sup> )	Pressão específica no molde (kgf/cm <sup>2</sup> )
NR 50 NF	160	510	200	564
NR 60 NF	160	529	210	592
NR/EPDM MWCNT	160	508	150	423

O tempo de cura ou vulcanização utilizado foi determinado de acordo com o tempo ótimo de vulcanização ( $t_{90}$ ) da curva reométrica, adicionado 4 min, devido à complexidade do molde e dimensional da peça a ser vulcanizada.

a) Após a vulcanização da peça a mesma foi retirada do molde e analisada, a fim de averiguar possíveis falhas de moldagem;

b) Por fim, as amostras aprovadas foram condicionadas em temperatura ambiente;

Foram vulcanizadas nove trilhas com o composto NR 50NF, 12 trilhas com o composto NR 60NF e três trilhas com o composto NR/EPDM MWCNT constituindo o kit 1 para teste de campo, e para o kit 2 (teste de performance do feijão) foi seguindo o mesmo processo já descrito.



Figura 5.27. (À esquerda) - Pré-elaborado de borracha e inserto metálico preparado com primer e adesivo antes da vulcanização/ (À Direita) - Amostras após o processo de vulcanização.

#### 5.4. Testes em campo das amostras

Nesta seção serão expostos os dados obtidos em campo, com as amostras trabalhando em condições normais de colheita em uma colheitadeira automotriz. Os dados estão divididos em performance, quanto as pré-características desejáveis dos materiais em estudo, e a performance real obtida no incremento ou não na qualidade da semente colhida.

### 5.4.1. Desempenho do material na colheita da cultura de soja

#### 5.4.1.1. Adaptação da colheitadeira em campo para o pré-teste

A adaptação foi executada a partir da configuração original da máquina, onde por meio da janela superior do alimentador, que fica após a plataforma de corte, tornou-se possível o acesso e retirada das barras originais de trilha e a configuração das amostras. Como já mencionado no item 4.7 anterior, optou-se por fazer um molde seccionado (elementos seccionados). Para adaptar as amostras sobre o cilindro, foi refeita a furação central e reutilizadas as furações laterais (Figura 5.28), configurando assim 3 amostras da composição elastomérica no lugar de uma metálica.

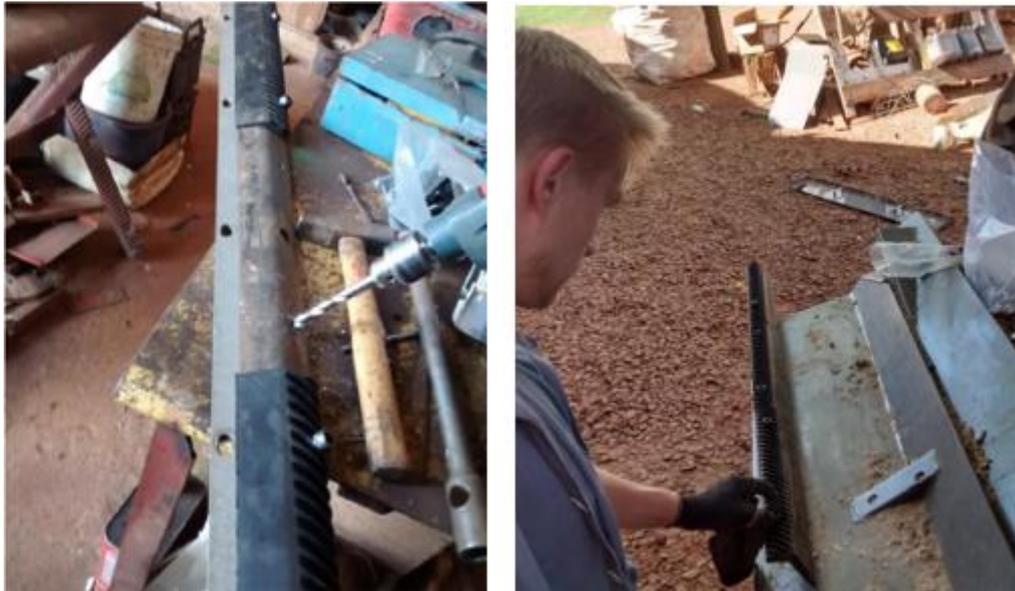


Figura 5.28. Processo de adaptação

Como foi retirado peso (massa) do cilindro de trilha, devido à massa específica do material aplicado ser muito inferior às barras metálicas, optou-se por trabalhar com faixas de rotações mais baixas visando evitar problemas de vibração e ou ressonância devido a um possível desbalanceamento do sistema como um todo.

#### 5.4.1.2. *Pré-teste das amostras*

Por não se ter nenhum conhecimento em condições de funcionamento para este material, nos primeiros metros de colheita, as amostras avaliadas foram coletadas a cada 200 m lineares percorridos, para análise visual do material (figura 5.29).



Figura 5.29. (à esquerda) Primeira rodada de pré-teste das amostras, (à direita) Descarregamento de grãos para o início dos testes de performance.

Após o primeiro graneleiro descarregado (caixa de armazenamento de grão) e visto que o material coletado não aparentava avaria, procederam-se as coletas de grão de modo efetivo.

#### 5.4.1.3. *Coleta de grãos nas máquinas*

Como já citado todas as coletas foram realizadas no tanque graneleiro. Por questões de disponibilidade de máquina e lavoura, optou-se por esta área de teste pois poderíamos fazer uma análise de similaridade comparativa entre outras duas máquinas (Comparativas pois as outras duas máquinas não possuíam o mesmo sistema de processamento).

A primeira máquina comparada foi uma colheitadeira da marca Massey Ferguson modelo MF34, ano de fabricação 2006, com processador do tipo convencional (Figura 5.30).



Figura 5.30. Máquina colheitadeira MF34 ano modelo 2006.

Para essa máquina o cilindro de trilha é muito similar ao da máquina de testes das amostras, no entanto as configurações já estavam otimizadas para este sistema. Foi verificado duas faixas de rotação e o côncavo todo aberto na última posição.

A outra máquina foi uma colheitadeira da marca New Holland, modelo CR5080, ano de fabricação 2013, do tipo de processador exclusivamente axial (Figura 5.31).



Figura 5.31. Máquina colheitadeira CR5080 ano modelo 2013.

Por se tratar de um sistema de trilha totalmente diferente, ficou impossível ajustar alguma configuração similar ao sistema de trilha tangencial que a máquina de testes possuía, portanto, foi somente realizada uma coleta na máquina, na condição atual que a mesma estava colhendo.

#### **5.4.1.4.** *Resultados de quebra de grão de soja*

Como a janela de colheita estava prestes a acabar e a máquina de testes apresentar alguns problemas operacionais, conseguiu-se somente executar uma coleta na máquina de testes com cilindro de trilha normal com as barras metálicas, sendo que as variações de configuração foram executadas somente com o novo material no cilindro. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.21, destacando-se quebra de grão no final da tabela indicado como "metálicas", que se trata do dia anterior à adaptação; e no início da tabela as coletas com as configurações do novo material. A umidade de grão foi levada em consideração, conforme mencionado por França Neto et al. (2007), quando indica que a condição de colheita do grão deve

estar abaixo de 15% de umidade e, no caso, o grão se encontrava com 13% de umidade no dia das coletas.

Tabela 5.21. Quebra de grão colheitadeira MF6690(máquina de testes) na colheita da soja

Barra Cilindro	Posição Côncavo	Rotação Cilindro (RPM)	Deslocamento (Km/h)	Quebra de grão (%)	Media (%)	Coefficiente de Variação	Desvio Padrão
Compósito	8	450	5	14,1	14,0	1%	0,12
Compósito				14,3			
Compósito				13,7			
Compósito	13	450	5	10,5	10,5	1%	0,09
Compósito				10,7			
Compósito				10,3			
Compósito	17	450	5	8,5	8,5	1%	0,10
Compósito				8,3			
Compósito				8,7			
Compósito	8	550	5	12,5	12,4	2%	0,13
Compósito				12,7			
Compósito				12,1			
Compósito	13	550	5	8,0	8,0	1%	0,08
Compósito				7,9			
Compósito				8,2			
Compósito	17	550	5	8,0	8,0	1%	0,08
Compósito				7,8			
Compósito				8,1			
Compósito	8	600	5	11,0	11,1	1%	0,09
Compósito				10,9			
Compósito				11,3			
Compósito	13	600	5	10,0	10,0	1%	0,09
Compósito				9,8			
Compósito				10,2			
Compósito	17	600	5	11,3	11,4	2%	0,13
Compósito				11,1			
Compósito				11,7			
Metálica	17	550	5	26,5	26,5	2%	0,13
Metálica				26,0			
Metálica				26,9			

Para a colheitadeira MF34, somente executou-se duas variações de rotação, apresentadas na tabela 5.22, não podendo chegar às rotações inferiores devido ao

risco de acúmulo de material no processador por deficiência de separação, pois se tratava de uma máquina com sistema 100% convencional.

Tabela 5.22. Quebra de grão colheitadeira MF34

Barra Cilindro	Posição Concavo	Rotação Cilindro (RPM)	Deslocamento (Km/h)	Quebra de grão (%)	Media	Coefficiente de Variação	Desvio Padrão
Metálica	17(12)*	850	5	12,3	12,5	1%	0,08
Metálica				12,7			
Metálica				12,5			
Metálica	17(12)*	1050	5	26,9	26,5	1%	0,09
Metálica				26,3			
Metálica				26,4			

\*o valor em parênteses equivale a uma similaridade com a máquina de testes.

Para a colheitadeira CR5080, realizou somente uma coleta (Tabela 5.23) pelos motivos já citados anteriormente:

Tabela 5.23. Quebra de grão colheitadeira CR5080

Barra Cilindro	Posição Concavo	Rotação Cilindro (RPM)	Deslocamento (Km/h)	Quebra de grão (%)	Media	Variância	Desvio Padrão
Metálica	---	1000	5	6,8	6,6	0,02	0,12
Metálica				6,5			
Metálica				6,4			

A Tabela 5.23 somente afirma o que Petkevichius et al. (2008) e Hanna et al. (2007) mencionaram sobre o índice de quebra em máquinas axiais ser menor que outro sistema industrial.

#### **5.4.1.5.** *Análise dos resultados de quebra de grão*

Como mencionado, a análise dos resultados foi executada utilizando uma balança de precisão com leitura de até 0,005 g, sendo que as amostras foram coletadas e separadas na pesagem de 1 Kg cada, e através dessa pesagem quantificado os grãos quebrados neste volume de grãos.

A diferença antes e após o uso do material, chegou a um ganho de eficiência em quebra de grão de até 3,3 vezes melhor em relação ao sistema atual (barras metálicas), neste caso, considerando somente performance de colheita, desconsiderando a perda de massa das amostras.

#### **5.4.1.6.** *Análise das amostras dos compósitos pós-teste de colheita*

A análise visual do material foi realizada constantemente ao longo dos testes, as barras de trilha seguiram sendo inspecionadas após a coleta de amostras de hora em hora, pela abertura inferior ao alimentador da colheitadeira.

O desgaste abrasivo apresentado foi constatado, somente após 15 h de teste, que as amostras demonstraram um desgaste visual. Porém, o material apresentou uma eficiência de trilha normal, mesmo após 20 h de trilha da máquina, sendo finalizado os testes com 21h. A tabela 5.23 mostra os resultados de perda de massa para as amostras de NR60, NR50, NR/EPDM MWCNT.

Tabela 5.24. Perda de massa nas amostras

LE – Barra Lado esquerdo; LD – Barra Lado direito; C – Barra Central; PM – Perda de Massa

ID Amostra	Material	Antes	Depois	Posição	PM (g)	DP	PM%
1	NR60 NF	0,735	0,685	LD	0,050	0,01	<b>6,80%</b>
2	NR60 NF	0,735	0,665	C	0,070	0,01	<b>9,52%</b>
3	NR60 NF	0,730	0,670	LE	0,060	0,01	<b>8,22%</b>
4	NR50 NF	0,735	0,705	LD	0,030	0,01	<b>4,08%</b>
5	NR50 NF	0,745	0,680	C	0,065	0,01	<b>8,72%</b>
6	NR50 NF	0,730	0,685	LE	0,045	0,01	<b>6,16%</b>
7	NR60 NF	0,735	0,645	C	0,090	0,01	<b>12,24%</b>
8	NR60 NF	0,740	0,695	LE	0,045	0,01	<b>6,08%</b>
9	NR60 NF	0,735	0,685	LD	0,050	0,01	<b>6,80%</b>
10	NR50 NF	0,735	0,700	LE	0,035	0,01	<b>4,76%</b>
11	NR50 NF	0,735	0,660	C	0,075	0,01	<b>10,20%</b>
12	NR50 NF	0,730	0,675	LD	0,055	0,01	<b>7,53%</b>
13	NR60 NF	0,745	0,660	C	0,085	0,01	<b>11,41%</b>
14	NR60 NF	0,735	0,685	LE	0,050	0,01	<b>6,80%</b>
15	NR60 NF	0,725	0,670	LD	0,055	0,01	<b>7,59%</b>
16	NR50 NF	0,725	0,695	LE	0,030	0,01	<b>4,14%</b>
17	NR50 NF	0,735	0,665	C	0,070	0,01	<b>9,52%</b>
18	NR50 NF	0,735	0,690	LD	0,045	0,01	<b>6,12%</b>
19	NR60 NF	0,725	0,690	LE	0,035	0,01	<b>4,83%</b>
20	NR60 NF	0,730	0,645	C	0,085	0,01	<b>11,64%</b>
21	NR60 NF	0,740	0,695	LD	0,045	0,01	<b>6,08%</b>
22	MWCNT	0,735	0,665	C	0,070	0,01	<b>9,52%</b>
23	MWCNT	0,725	0,690	LE	0,035	0,01	<b>4,83%</b>
24	MWCNT	0,735	0,675	LD	0,060	0,01	<b>8,16%</b>

A coluna de posição apresentada na Tabela 5.24 (quinta coluna) demonstra a posição que se encontrava a amostra montada no cilindro de trilha da colheitadeira. A Figura 5.32 ilustra melhor a distribuição das amostras no cilindro.

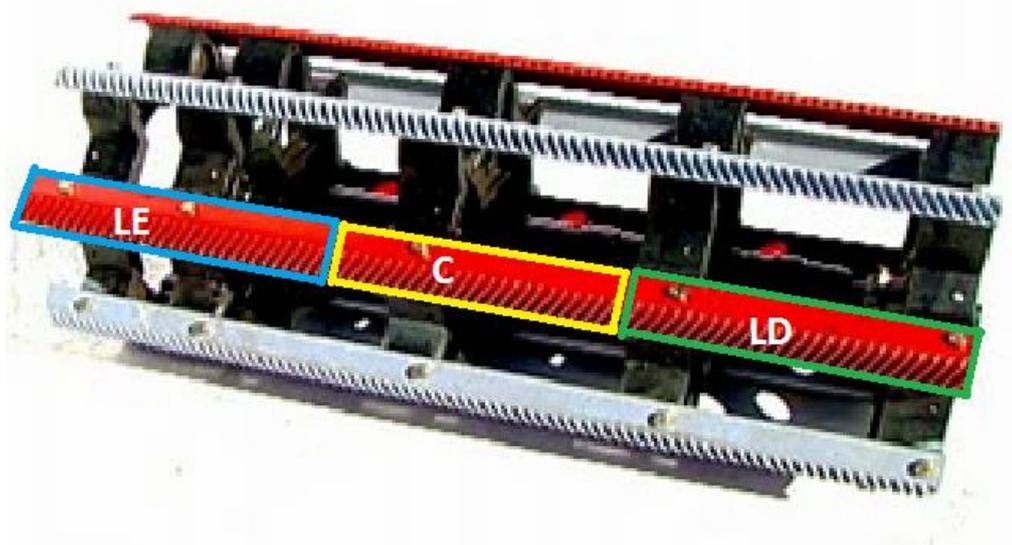


Figura 5.32. Distribuição das amostras no cilindro de trilha.

O fato evidenciado para o equipamento é de que as amostras centrais apresentaram um desgaste muito maior que as laterais, o que afirma a existência de uma certa centralização de material no cilindro de trilha, onde obtivemos uma perda de massa média de 5,73% para barras esquerdas, 6,65% para barras direitas e 10,35% para barras centrais, isto considerando uma média dos dados da tabela 5.24.

#### 5.4.2. Desempenho do material na colheita de feijão

##### 5.4.2.1. Adaptação da colheitadeira em campo para o teste na cultura de feijão

Em todas as montagens foi retirado o canal embocador da colheitadeira com a plataforma acoplada, sendo que para a adaptação foi demandado o tempo de montagem médio de 3 horas, devido ao enclausuramento das amostras, como ilustrado na Figura 5.33 A. Este tempo não afetou condição de colheita dos grãos, pois a variação de umidade entre início dos testes, e setup para o segundo teste não ultrapassaram um ponto percentual.

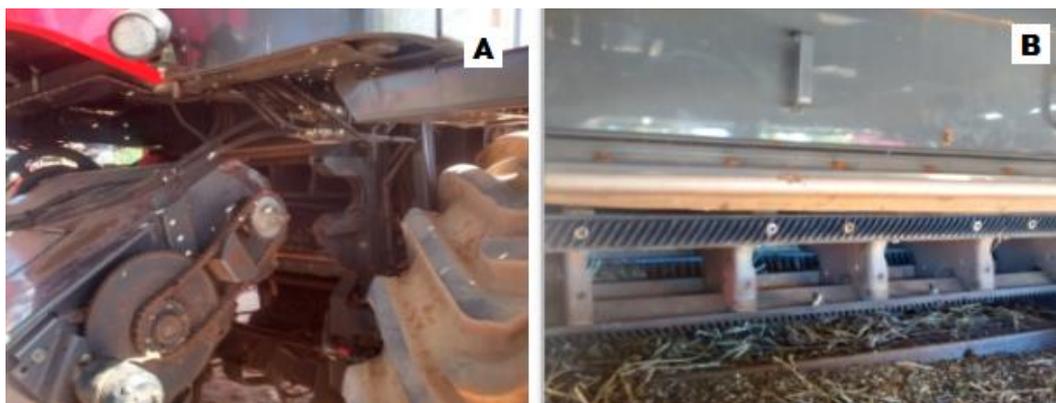


Figura 5.33. Janela de adaptação na colheitadeira a esquerda (A), e a direita(B) as amostras montadas sob o cilindro de trilha.

Foi utilizada a furação que já havia sido preparada na adaptação executada no cilindro de trilha para a colheita de soja do primeiro teste realizado, a Figura 5.34 B mostra a barra emborrachada montada sob o cilindro de trilha antes de execução das coletas para os testes de qualidade de grão.

#### 5.4.2.2. Resultado análise técnica do grão de feijão

Como foi optado previamente por se elaborar uma análise comparativa, serão apresentados inicialmente os dados obtidos para a configuração normal de colheita com as barras metálicas, ilustrados na Figura 5.34. Os resultados apresentados nas tabelas 5.25, 5.26, 5.27, e 5.28, apresentam os resultados de análise técnica de qualidade de grão, não executadas na colheita de soja, onde foi somente mensurada a quebra.

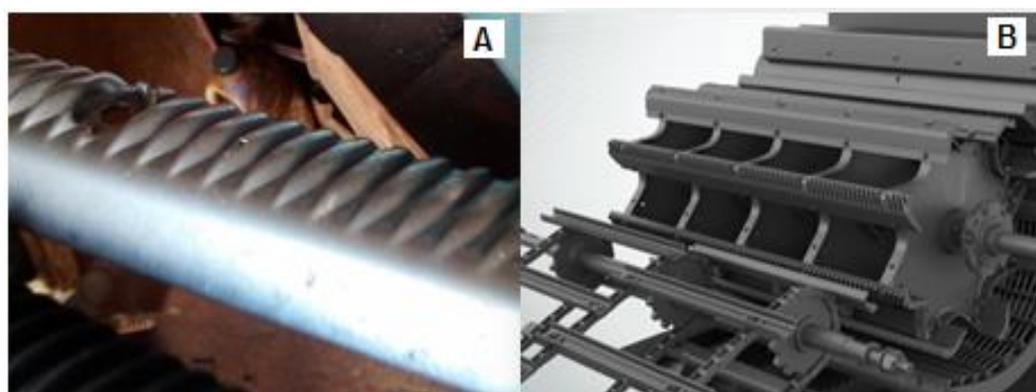


Figura 5.34. B - Sistema original/A – Detalhe barra de trilha metálica.

Na sequência é apresentado os resultados individuais para cada teste dividido na tabela 5.25 que apresenta os resultados a 3km/h (fluxo normal) e tabela 5.26 que apresenta os resultados a 5km/h (fluxo aumentado).

Tabela 5.25. Resultados da qualidade de grão com o deslocamento de 3km/h, onde Côncavo Aberto Posição 17, e Côncavo Fechado posição 7.

Tipo de teste	3Km/h	
	<i>Côncavo Aberto</i>	<i>Côncavo Fechado</i>
Sementes Quebradas	23,8%	24,5%
Dano Mecânico	15,0%	15,0%
Hipoclorito	17,0%	20,0%
Viabilidade das sementes	81,0%	83,0%
Semente Pura	74,9%	80,0%

Tabela 5.26. Resultados da qualidade de grão com o deslocamento de 5km/h, onde Côncavo Aberto Posição 17, e Côncavo Fechado posição 7.

Tipo de teste	5Km/h	
	<i>Côncavo Aberto</i>	<i>Côncavo Fechado</i>
Sementes Quebradas	26,9%	27,5%
Dano Mecânico	13,0%	14,0%
Hipoclorito	21,0%	21,0%
Viabilidade das sementes	85,0%	84,0%
Semente Pura	72,5%	72,2%

De acordo com os dados da tabela, foi possível visualizar que o maior número de sementes quebradas ocorreu na velocidade de 5Km/h com o côncavo mais fechado, ou seja, com maior fluxo de material em um menor espaço. Já o dano mecânico (imperceptível a olho nu) foi evidenciado em maior número na velocidade

de 3Km/h, o que pode ser considerado pelo menor fluxo de material (Palha+Grão) no sistema, o que acarreta em mais tempo de danificar o grão.

Como sequência da análise comparativa, a figura 5.35 ilustra a configuração utilizada na colheitadeira para o teste sendo a unidade de trilha configurada com as três amostras de materiais, na mesma maneira utilizada para a colheita de soja.

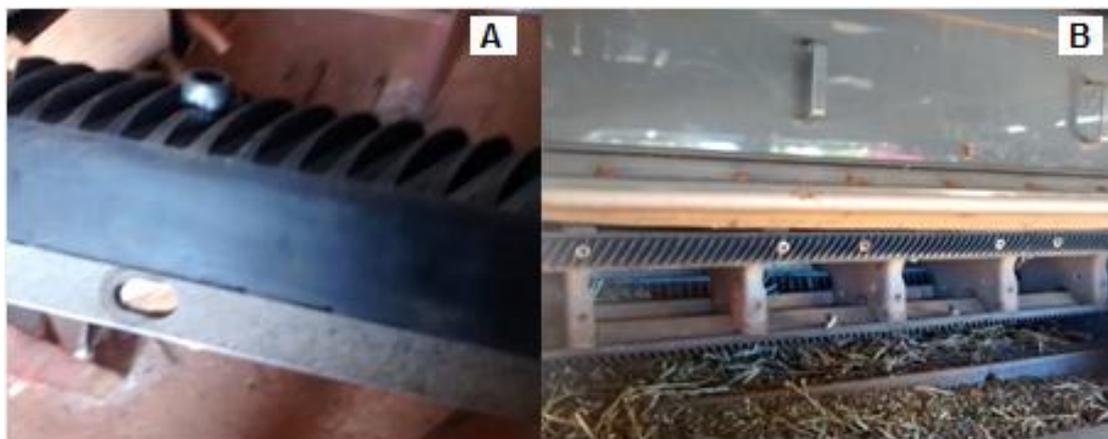


Figura 5.35. B - Sistema montado com as amostras/A – detalhe da barra de trilha elastomérica.

A tabela 5.27 apresenta os resultados com velocidade de deslocamento de 3km/h (fluxo normal) e a tabela 5.28 os de deslocamento a 5km/h (fluxo aumentado).

Tabela 5.27. Resultados da qualidade de grão com o deslocamento de 3km/h, onde Côncavo Aberto Posição 17, e Côncavo Fechado posição 7.

Tipo de teste	3Km/h	
	<i>Côncavo Aberto</i>	<i>Côncavo Fechado</i>
Sementes Quebradas	23,1%	23,9%
Dano Mecânico	9,0%	8,0%
Hipoclorito	15,0%	18,0%
Viabilidade das sementes	87,0%	90,0%
Semente Pura	72,1%	71,5%

Tabela 5.28. Resultados da qualidade de grão com o deslocamento de 5km/h, onde Côncavo Aberto Posição 17, e Côncavo Fechado posição 7.

Tipo de teste	5Km/h	
	<i>Côncavo Aberto</i>	<i>Côncavo Fechado</i>
Sementes Quebradas	23,9%	22,6%
Dano Mecânico	11,0%	11,0%
Hipoclorito	13,0%	17,0%
Viabilidade das sementes	87,0%	86,0%
Semente Pura	74,9%	75,5%

Considerando o mesmo ponto de 5Km/h e côncavo fechado obteve-se uma melhora de 4,9%, e no dano mecânico a 3Km/h e côncavo fechado (posição 7) foi obtido uma melhora de 7,0% em relação as barras metálicas na mesma condição. Para as variações de côncavo não foi identificado nenhuma variação bem definida pois na velocidade de 5km/h a quebra até diminuiu, o que pode ser atrelado a um fluxo constante otimizado para esse tipo de colheita, pois a velocidade de 3km/h o dano até diminuiu com o côncavo mais fechado. O fator principal para a alteração na qualidade em sementes relacionado ao côncavo foi o dano, onde quanto mais fechado o espaçamento entre cilindro e côncavo, maior o dano, independente da velocidade de deslocamento.

#### **5.4.2.3. Análise Comparativa na cultura de feijão**

A intenção destas análises não era obter uma comparação específica, apenas executar-se-ia uma comparação com a máquina da área de testes, que no caso desta propriedade, uma colheitadeira marca Massey Ferguson, modelo MF9690 com sistema de trilha axial, ano modelo 2011 (Figura 5.36) equipada com sistema redutor do alimentador (similar ao sistema de trilha de máquinas tangenciais) e côncavos de alta vazão na unidade de trilha.



Figura 5.36. Colheitadeira axial utilizada no comparativo modelo MF9690 ano de fabricação 2011.

O teste comparativo de quebra foi realizado na mesma condição de colheita (velocidade 3km/h) e umidade (17,5%), e também tamanho de plataforma (25" para ambas), a diferença principal estava no tipo de equipamento de colheita, que no caso a MF9690 além de ser trilha axial, também estava preparada para o feijão (Kit redutor e Acessórios). Já a máquina de testes (MF6690) é uma máquina híbrida (com trilha tangencial), sem nenhuma preparação para a colheita de feijão. Para a colheitadeira axial foi evidenciado uma quebra de 0,005g a cada 1 quilo, ou 5% de quebra, e na máquina híbrida foi evidenciado 0,028g a cada 1 quilo ou 28% na sua configuração de fábrica com barras de trilha metálicas na unidade de industrial, e nenhuma preparação para o feijão.

#### **5.4.2.4.** *Perda de massa das amostras do teste de feijão.*

A tabela 5.29 mostra os resultados de perda de massa para as amostras de NR60, NR50, NR/EPDM MWCNT, oriundas dos testes executados na cultura de feijão.

Tabela 5.29. Perda de massa nas amostras oriundas da colheita de feijão

LE – Barra Lado esquerdo; LD – Barra Lado direito; C – Barra Central; PM – Perda de Massa

ID Amostra	Material	Antes	Depois	Posição	PM (g)	DP	PM%
25	NR60 NF	0,725	0,710	LD	0,015	0,02	<b>2,07</b>
26	NR60 NF	0,725	0,695	C	0,030	0,02	<b>4,14</b>
27	NR60 NF	0,730	0,710	LE	0,020	0,02	<b>2,74</b>
28	NR50 NF	0,725	0,700	LD	0,025	0,02	<b>3,45</b>
29	NR50 NF	0,725	0,690	C	0,035	0,02	<b>4,83</b>
30	NR50 NF	0,730	0,715	LE	0,015	0,02	<b>2,05</b>
31	NR60 NF	0,735	0,705	C	0,030	0,02	<b>4,08</b>
32	NR60 NF	0,730	0,715	LE	0,015	0,02	<b>2,05</b>
33	NR60 NF	0,735	0,715	LD	0,020	0,02	<b>2,72</b>
34	NR50 NF	0,735	0,720	LE	0,015	0,02	<b>2,04</b>
35	NR50 NF	0,725	0,690	C	0,035	0,02	<b>4,83</b>
36	NR50 NF	0,730	0,705	LD	0,025	0,02	<b>3,42</b>
37	NR60 NF	0,725	0,690	C	0,035	0,02	<b>4,83</b>
38	NR60 NF	0,720	0,705	LE	0,015	0,02	<b>2,08</b>
39	NR60 NF	0,725	0,710	LD	0,015	0,02	<b>2,07</b>
40	NR50 NF	0,725	0,710	LE	0,015	0,02	<b>2,07</b>
41	NR50 NF	0,735	0,705	C	0,030	0,02	<b>4,08</b>
42	NR50 NF	0,730	0,715	LD	0,015	0,02	<b>2,05</b>
43	NR60 NF	0,735	0,720	LE	0,015	0,02	<b>2,04</b>
44	NR60 NF	0,730	0,695	C	0,035	0,02	<b>4,79</b>
45	NR60 NF	0,740	0,725	LD	0,015	0,02	<b>2,03</b>
46	MWCNT	0,765	0,745	LE	0,020	0,02	<b>2,61</b>
47	MWCNT	0,755	0,725	C	0,030	0,02	<b>3,97</b>
48	MWCNT	0,760	0,745	LD	0,015	0,02	<b>1,97</b>

A Figura 5.37 ilustra a perda de massa média das amostras de NR 50 NF, onde a mesma apresenta sua perda real até 7 horas de trilha de acordo com o apresentado na tabela anterior, e a após isto calculou-se uma estimativa de perda total de massa.

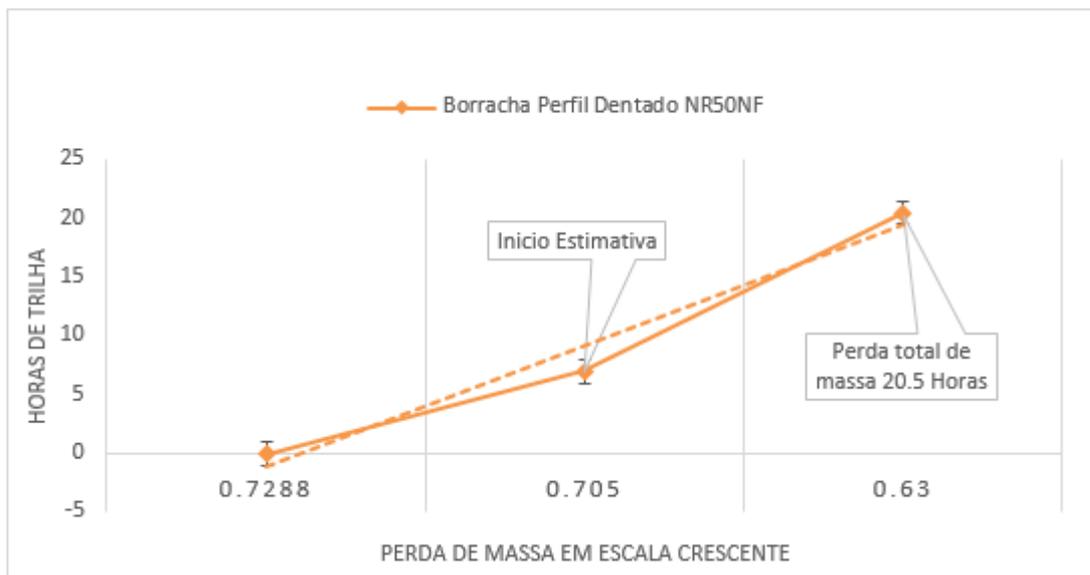


Figura 5.37. Perda de massa média das amostras de NF50NF

A figura 5.38 apresenta a perda de massa média das amostras de NR 60 NF, onde da mesma maneira até 7 horas de trilha apresenta a perda real de massa, e após isso uma estimativa de vida útil.

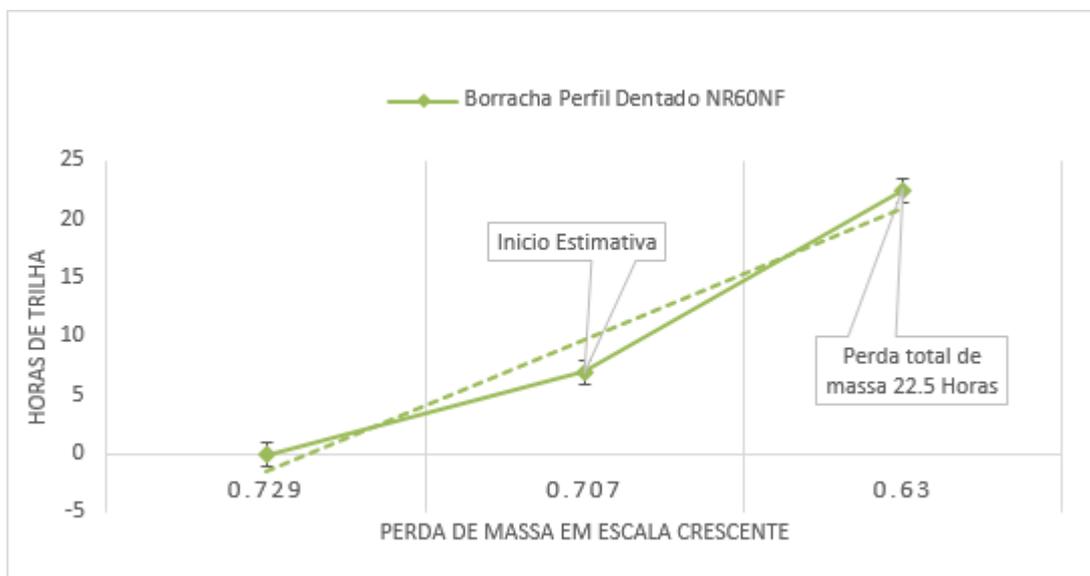


Figura 5.38. Perda de massa média das amostras de NR60NF

Por último a figura 5.39 apresenta a perda de massa das amostras de NR/EPDM MWCNT, considerando da mesma maneira a perda real de massa até 7

horas de trilha da colheitadeira, após isso uma estimativa de vida até a perda total de massa.

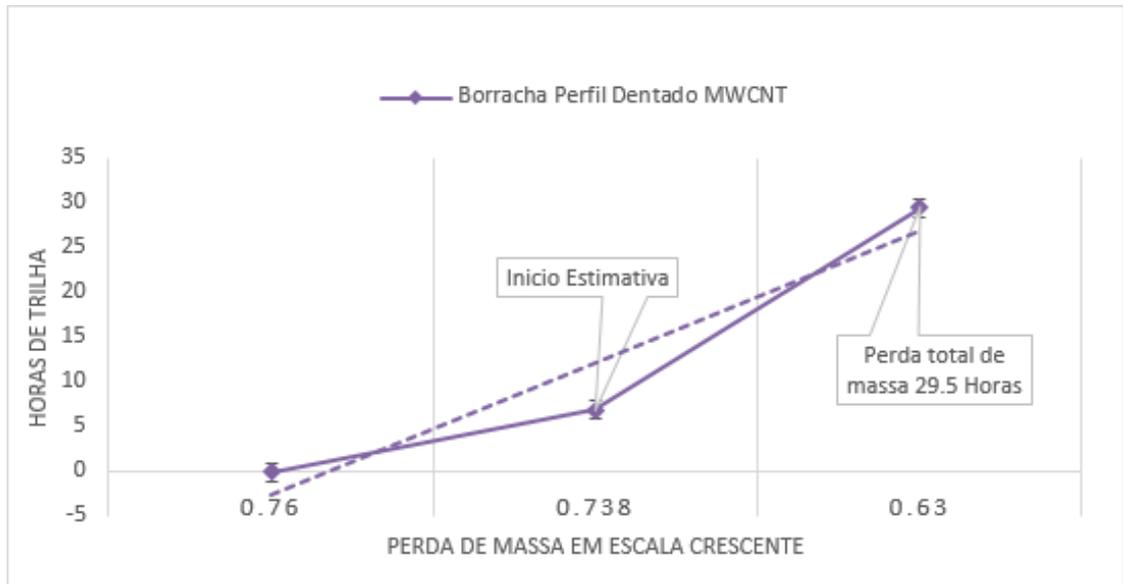


Figura 5.39. Perda de massa média das amostras de NR/EPDM/MWCNT

Com base nos resultados apresentados ficou evidente uma leve diferença da amostra com MWCNT em relação as amostras que tinham somente NF sua mistura, no entanto praticamente igual o desgaste se for considerado o desvio padrão entre as duas composições. O fato de o valor da estimativa ter ficado maior é relativo ao peso inicial mais alto em relação as demais amostras.

### 5.5. Caracterização de superfície pós teste de campo via MEV

As imagens obtidas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) estão divididas de acordo com localização das zonas indicada na figura 5.40, onde a zona 1 é o primeiro contato considerando o sentido de rotação do cilindro de trilha, e consequentemente zona 2 e 3.

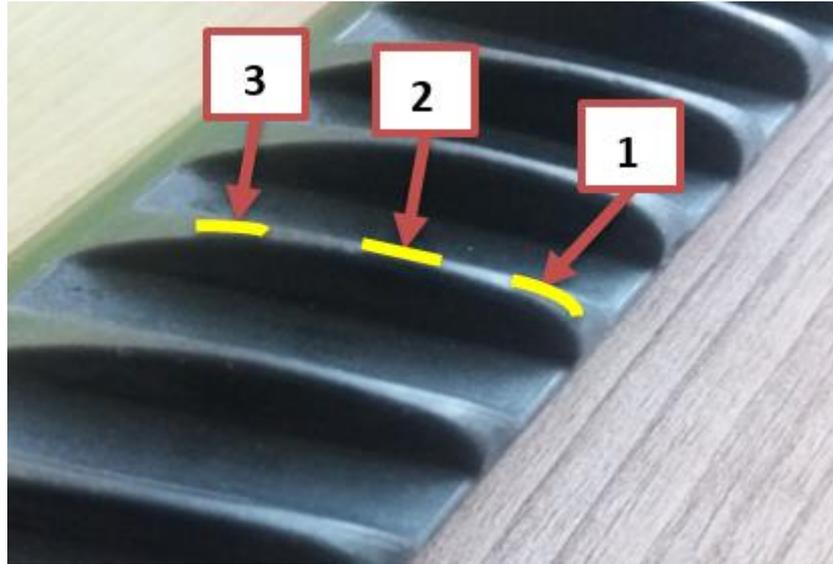


Figura 5.40. Localização das imagens geradas pela microscopia eletrônica de varredura sobre o protótipo testado em campo.

As imagens abaixo ilustradas na figura 5.41, 5.42, e 5.43 foram realizadas nas amostras que passaram pelos testes da colheita de feijão. Nas ilustrações a b e c da figura 5.42 ficou evidente visualizar a trilha de desgaste que o material sofreu no sentido de entrada de palha/grão ou MOG na máquina.

Já na sequência de comparativos de imagens de aproximação d, e, e f ilustram as ampliações destacadas no quadrado vermelho. É possível perceber notoriamente micro rachaduras em sua superfície na amostra “e” (NR/EPDM/MWCNT). As trilhas no sentido do material desta imagem existem, porém não com tanto destaque em comparação com as outras.

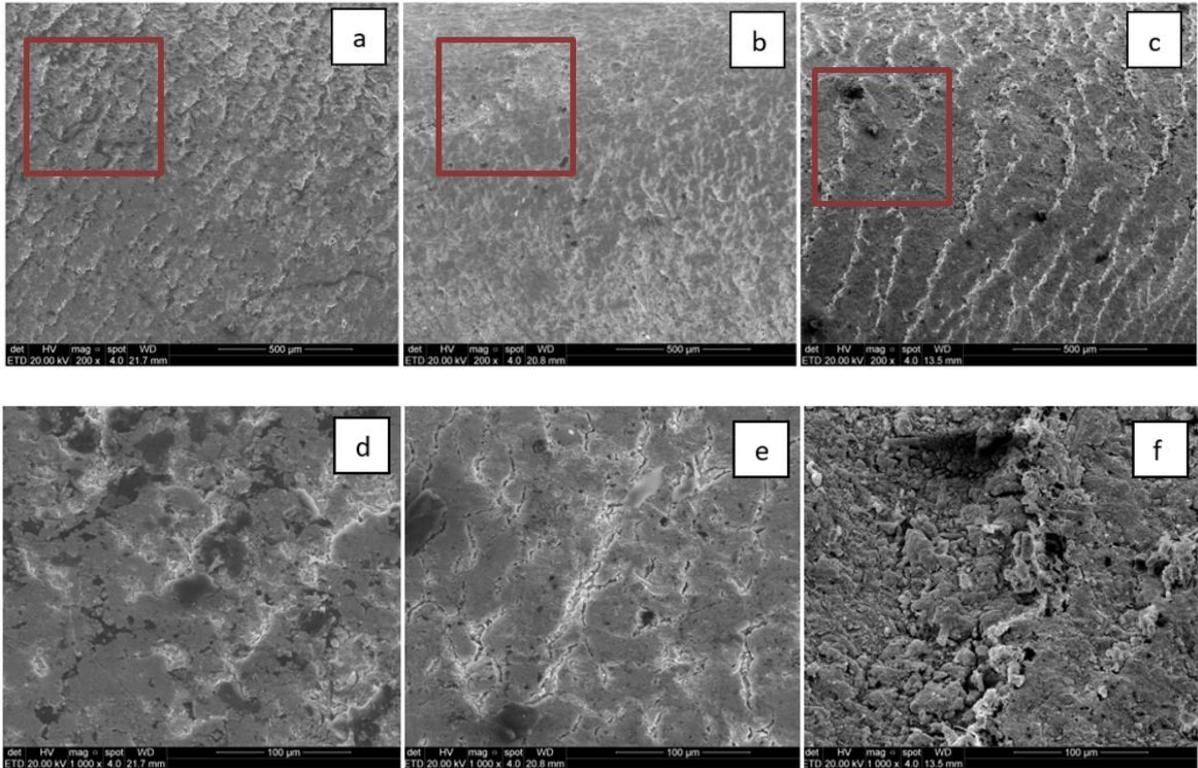


Figura 5.41. MEV da zona 1 de: a) NR60NF 500µm/ b) NR/EPDM/MWCNT 500µm / c) NR50NF 500µm/ d) NR60NF 100µm/ e) NR MWCNT 100µm / f) NR50NF 100µm

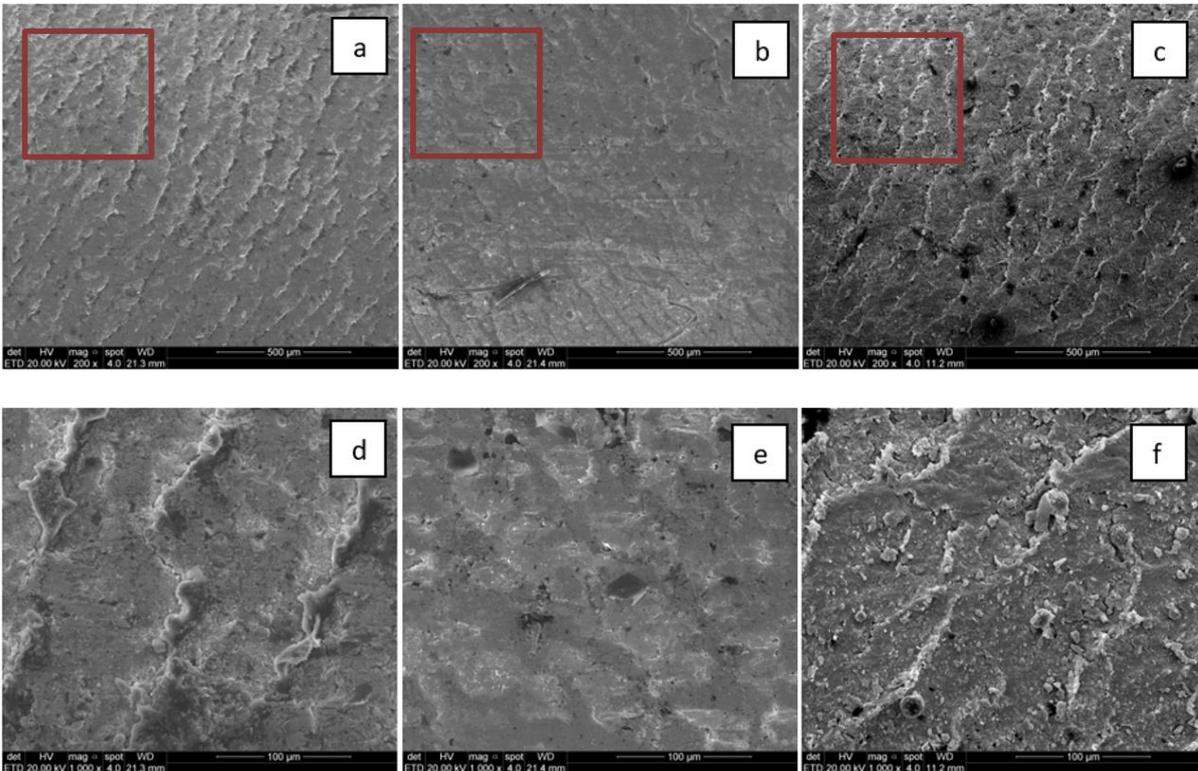


Figura 5.42. MEV da zona 2 de: a) NR60NF 500µm/ b) NR/EPDM/MWCNT 500µm / c) NR50NF 500µm/ d) NR60NF 100µm/ e) NR MWCNT 100µm / f) NR50NF 100µm

Novamente nas ilustrações a b e c da figura 5.43 é possível ver as trilhas no sentido de contato com o material dentro da unidade de trilha da colheitadeira, porem as trilhas nesta superfície também apresentaram menos destaque/intensidade nas amostras de NR/EPDM/MWCNT apresentadas na imagem b, e na aproximação da imagem “e”.

Nas imagens da figura 5.44, nas amostras de NR50NF e NR60NF (a, c, d, f) mais uma vez é possível visualizar o sentido de contato com o material que estava passando na unidade de trilha. Porém nas amostras de NR/EPDM/MWCNT visualmente percebeu-se a incidência de geometrias diferentes na superfície, o que pode ser relacionado a não dispersão dos nanotubos de carbono na matriz da borracha naquela área.

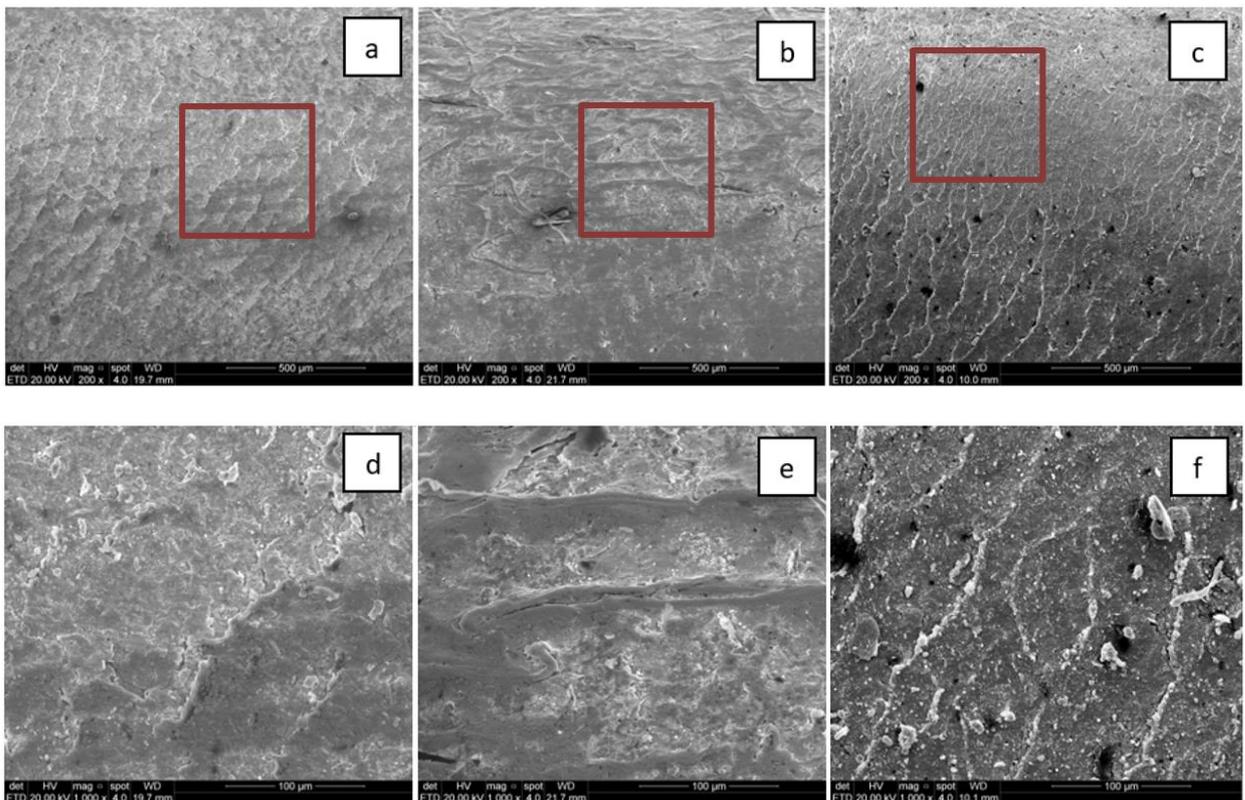


Figura 5.43. Micrografia eletrônica de varredura da zona 3 de: a) NR60NF 500μm/ b) NR/EPDM/MWCNT 500μm / c) NR50NF 500μm/ d) NR60NF 100μm/ e) NR MWCNT 100μm / f) NR50NF 100μm

Com base nos ensaios realizados em campo percebeu-se o ótimo desempenho perante a melhora na qualidade de grão somente com a sua introdução, e também nos ensaios laboratoriais foi possível distinguir as peculiaridades de cada borracha e os fatores que as cargas de reforços propiciam para cada composição..

## 6. CONCLUSÕES

Após análise das propriedades físico-mecânicas, antes e após envelhecimento, e do comportamento frente ao ozônio conforme a norma, aliando as características de processamento, foi possível optar por três formulações para confeccionar as barras de trilhas do cilindro. A formulação NR 60 NF, de borracha natural reforçada com 60 phr de negro de fumo, apresentou bom balanço de propriedades, com valores de dureza, resistência ao rasgo e abrasão adequados para a aplicação em questão. Além disso, o processamento deste composto foi facilitado, se comparado com sílica e MWCNT, além de demandar menos energia para mistura. Esta formulação apresentou um tempo de scorch ( $t_{s1}$ ) e viscosidade Mooney adequados para moldagem por compressão, processo que foi utilizado para o recobrimento e vulcanização da superfície metálica.

Por este estudo pode-se observar o grande poder de reforço do MWCNT, pois com apenas 5 phr (2,7 % em peso) deste material no composto substituindo o negro de fumo, houve um aumento significativo na viscosidade (acima de 15%), dureza, tensão de ruptura e resistência à abrasão e, aumentou consideravelmente o módulo.

Já os dados apresentados pelas amostras tendo a Sílica como agente de reforço não demonstraram muita diferença perante os demais, o que confirma os estudos de Mané (2013), os dados de sílica demonstraram-se até inferiores aos de somente negro de fumo, inviabilizando a fabricação, pois o processo com a sílica para agente de reforço é mais oneroso, demandando mais energia e tempo de processo, o que foi também evidenciado por Das (2012) na mistura da sílica com borracha SBR

Após as análises das imagens de MEV/AFM foi possível visualizar tanto uma distribuição não uniforme em algumas condições, bem como uma condição de desgaste visivelmente diferente para as amostras que continham nanotubo de carbono em sua matriz, além de visualizar os padrões de abrasão descritos também por Tabsan e colaboradores (2010). Em contraste a isso, as análises dinâmico-mecânicas mostraram que apesar de os materiais apresentarem diferença de vida útil, a performance de absorção de energia não segue a mesma direção resistência das borrachas. Já as simulações computacionais não demonstraram muita diferença entre as composições escolhidas, porém foi possível visualizar que todas elas apresentaram um grande deslocamento de massa, o que evidencia o caráter de amortecimento desejado para o sistema.

Para os dados de quebra de grão de soja, não foi evidenciado o proposto por Petkevichius et al. (2008), de que o aumento da rotação no cilindro aumenta o dano mecânico, pois nos testes realizados dentro da faixa apresentada não houve alteração considerável no que se refere ao quesito de quebra de grão, o fator principal para este aumento foi a diferença de espaço entre côncavo e cilindro, porém fato visualizado somente na colheita de soja.

No quesito resistência do material, obteve-se resultados satisfatórios em relação à resistência ao rasgo, pois durante as inspeções visuais não se evidenciou nenhum sinal de início de rasgamento, no entanto o ambiente extremamente hostil para o novo material (palha, grão e detritos) mostrou ser o principal fator de desgaste excessivo das amostras.

Na condição de colheita, tanto de feijão quanto para a soja, os materiais propostos cumpriram o objetivo de melhora de performance somente com a adição desse material elastomérico devido ao incremento em qualidade de semente, no entanto necessitam-se estudos sobre o equipamento para tratar de melhoras na unidade de trilha que visem a aplicabilidade específica de borrachas na colhedora

visto que, apesar da alta performance, o tempo de setup da máquina é alto e, para aumentar a viabilidade do mesmo, faz-se necessário diminuir o tempo de troca de peças, além de tornar apta a unidade de trilha a receber amostras com uma camada mais espessa, o que lhe aumentará a vida útil.

## 7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

As análises de performance tornaram-se promissoras no quesito melhoras nos números de dano mecânico ou quebra de grão, para tanto, tudo foi relativo a capacidade de absorção de energia da borracha, e pela dureza relativamente baixa em comparação aos metais, porém a mesma apresentou desgaste considerável. Novos materiais não compostos somente de borracha, mas polímeros como por exemplo o (PU) poliuretano pode ser uma solução viável em performance para a aplicação em questão.

Como já mencionado no último parágrafo das conclusões, estudos a ponto de desenvolver e projetar uma unidade de trilha na qual possamos diminuir setup da máquina, e desenvolver um cilindro de trilha apropriado para trabalhar somente com composições elastoméricas/poliméricas, não se atendo a adaptações, com certeza tornaria os testes muito mais simples, bem como uma aceitação melhor do produto, considerando um item de reposição, se diminuída a complexidade de troca.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTUNTAS, E., YIDIZ, M., **Effect of moisture content on some physical and mechanical properties of faba bean (*Vicia faba* L.) grains.** Journal of Food Engineering 78 (1), 174–183. 2007

AHMED K., NIZAMI S.S., RIZA N.Z., **Reinforcement of natural rubber hybrid composites based on marble sludge/Silica and marble sludge/rice husk derived sílica.** Journal of Advanced Research 5, 165–173, 2014

ASTM D 3182 (2007/2016) **Standard practice for rubber:** materials, equipment, and procedures for mixing standard compounds and preparing standard vulcanized sheets. West Conshohocken.

ASTM D2240 - 05(2010) **Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness.**

ASTM D5289 (2012) **Standard Test Method for Rubber Property—Vulcanization Using Rotorless Cure Meters.**

ASTM D412 - 06a (2013) **Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers—Tension.**

ASTM D624 - 00(2012) **Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers**

ASTM D297 - 15 **Standard Test Methods for Rubber Products—Chemical Analysis**, 2015.

ASTM D 573, **Standard Test Methods for Rubber - Deterioration in an Air Over**. 2004/2015.

ASTM D 429 - **Standard Test Methods for Rubber Property—Adhesion to Rigid Substrates**, 2004/2014.

ASTM D 429 - **Standard Test Methods for Rubber Property—Adhesion to Rigid Substrates**, 2004/2014.

ASTM D 822 - **Standard Practice for Filtered Open-Flame Carbon-Arc Exposures of Paint and Related Coatings**, 2013.

BARANWAL, K.; STEPHENS, H. **Elastomer Technology: special topics**. Baltimore: United Book Press, 2003.

BHATTACHARYA M., BHOWMICK A. K.. **Analysis of wear characteristics of natural rubber nanocomposites** Elsevier Science – Wear 269(152-166), India 2010.

BRASIL. Ministério da Agricultura e da Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**. Brasília: SNDA/DNDV/CLAV, 365p. 1992.

BRAUM, Marcos Vinicius., **Melhoria da interação polímero-carga através do uso de borracha de polibutadieno epoxidada**, Porto Alegre, Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Química da UNIVERSIDADE FEDERAL RIO GRANDE DO SUL, 2006.

BS 903-5, **Physical testing of rubber** – Part 5: Guide to the application of rubber testing to finite element analysis, 2004.

CONAB, Companhia Nacional do Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, V. 4 - SAFRA 2016/17- N. 5 - Quinto levantamento | ISSN: 2318-6852, 2017.

DAS A., KASALI WAL G.R., JURK R., BOLDT R., FISCHER D., STÖCKELHUBER K.W., HEINRICH G., **Rubber composites based on graphene nanoplatelets, expanded graphite, carbon nanotubes and their combination: A comparative study**, Elsevier Science – Composites Science and Technology 72(1961-1967), Germany 2012.

DEMÉTRIO DA SILVA, Vinícius; DOS SANTOS, LEONARDO M. ; SUBDA, Suelen M. ; LIGABUE, Rosane ; SEFERIN, Marcus ; CARONE, CARLOS L. P. ; EINLOFT, Sandra . **Synthesis and characterization of polyurethane/titanium dioxide nanocomposites obtained by in situ polymerization**. Polymer Bulletin (Berlin. Internet), v. 70, p. 1819-1833, 2013.

DIN ISO 4649:2006-11 (E) **Rubber, vulcanized or thermoplastic** - Determination of abrasion resistance using a rotating cylindrical drum device.

DUNN, D.J., Beswich, R.H.D., 2002. **Natural and Synthetic Latex Polymer**. Market Report, p. 30.

FELIZ, D.J., PROCTOR, A., MONSOOR, M.A., & EASON, R.L., **The effects of damaged kernels caused by combine harvester settings on milled rice free fatty acid levels**. Journal of Food Science, 70, 376e379, 2005.

FRANÇA NETO, J. de B.; KRZYZANOWSKI, F. C.; PÁDUA, G. P. de; COSTA, N. P. da; HENNING, A. **A.Tecnologia de produção de semente de soja de alta qualidade: série sementes**. Circular Técnica n.40. ondrina: Embrapa Soja, 2007.

Disponível em: <  
<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/467586>>. Acesso em: 15 nov. 2014.

FU J-F., YIU W-T., DONG X., CHEN L-Y., JIA H-S., SHI L-Y., ZHONG Q-D., **Mechanical and tribological properties of natural rubber reinforced with carbon blacks and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles**, Elsevier Science – Materials and Design 49(336-346), China 2013.

FUKAHORI Y., LIANG H., BUSFIELD J.J.C., **Criteria for crack initiation during rubber abrasion**. Elsevier Science – Wear 265(387-395), London 2008.

LIANG H., FUKAHORI Y., THOMAS A.G., BUSFIELD J.J.C. **The steady state abrasion of rubber: Why are the weakest rubber compounds so good in abrasion?** Elsevier Science – Wear 268(756-762), London 2010.

LIANG H., FUKAHORI Y., THOMAS A.G., BUSFIELD J.J.C. **Rubber abrasion at steady state** Elsevier Science – Wear 266(288-296), London 2011.

GABRIEL P., THOMAS A.G., BUSFIELD J.J.C. **Influence of interface geometry on rubber friction**. Elsevier Science – Wear 268 (747-750), London 2010.

GONZÁLEZ-DOMÍNGUEZ, J. M.; CASTELL, P.; BESPÍN-GASCÓN, S.; et al. **Covalent functionalization of MWCNTs with poly(p-phenylene sulphide) oligomers: a route to the efficient integration through a chemical approach**. Journal of Materials Chemistry, Amsterdam v. 22, n. 39, p. 21285, 2012.

HANNA H.M., QUICK G.R., **Grain Harvesting Machinery Design**, Handbook of Farm, Dairy, and Food Machinery, Pages 93–111, 2007.

HÖHER, Alberto. **Design de uma Peneira Rotativa para Colheitadeiras de Grão**. Porto Alegre, 2011. Dissertação. Programa de Pós Graduação em Design, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL.

ISO 289-1, **Rubber**, unvulcanized -- Determinations using a shearing-disc viscometer -- Part 1: Determination of Mooney viscosity, 2005/2014.

ISO 1431-1, **Rubber, vulcanized or thermoplastic** -- Resistance to ozone cracking -- Part 1: Static and dynamic strain testing, 2012.

KARGER-KOCSIS J., MOUSA A., MAJOR Z., BEKESI N., **Dry friction and sliding wear of EPDM rubbers against steel as a function of carbon black content** Elsevier Science - Wear 264( 359-367), Germany 2008.

KURASOV V S; KUCEEV V V., Obosnovanie dopustimyh parametrov deformacii pochatkov kukuruzy. [**The substantiation of admissible parameters of deformation for maize ears.**]. Tehnika v Seljskom Khozjajstve, 2, 22–24, 1999.

LORANDI N.P., CIOFFI M. O. H., ORNAGHI H., **Análise Dinâmico-Mecânica de materiais Compósitos poliméricos**, Scientia Cum Industria, V4, N 13, 48 – 60, 2016.

MANE Z., LOUBET J.L., GUERRET C., GUY L., SANSEAOU O., ODONI L., VANEL L., LONG D.R., SOTTA P., **A new rotary tribometer to study the wear of reinforced rubber materials**, Elsevier Science - Wear 306( 149-160), France 2013.

MANO, Eloisa Biasotto; MENDES, Luís Cláudio. **Introdução a polímeros**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999

MARCONDES, Maria C.; MIGLIORANZA, Édison; FONSECA, Inês C. de B. **Qualidade de sementes de soja em função do horário de colheita e do sistema de trilha de fluxo radial e axial**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 30, n. 2, p. 316-321, mar./abr. 2010.

MASTINU G., PLOECHL M., **Road and Off-Road Vehicle System Dynamics Handbook**, CRC Press, 1708 páginas, 2014.

MATTOSO, Luiz H. C.; DE MORAIS, Paulo C. **Nanotecnologia introdução, preparação e caracterização de nanomateriais e exemplos de aplicação.** São Paulo: Artlier, pág 17-19, 2006.

MESQUITA, C.M.; COSTA, N.P.; PEREIRA, J.E.; MAURINA, A.C.; ANDRADE, J.G.M. **Colheita mecânica da soja: avaliação das perdas e da qualidade física do grão.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 18, n.3, p. 44-53, 1999.

MESQUITA, C.M.; COSTA, N.P.; PORTUGAL, F.A.F. **Medidor de sementes quebradas para regulagens das colhedoras.** Informativo ABRATES, Londrina, v.9, n.1/2, p.61, 1999.

MILOSKOVSKA E., HRISTOVA-BOGAERDS D., DUIN M.V., WITH G., **In situ sílica–EPDM nanocomposites obtained via reactive processing,** European Polymer Journal 69, 260–272, 2015.

PAL K., RAJASEKAR R., KANG D.J., ZHANG Z.X., PAL S.K., DAS C.K., KIM J.K., **Influence of carbon blacks on butadiene rubber/high styrene rubber/natural rubber with nanosilica: Morphology and wear,** Elsevier Science – Materials and Design 31(1156-1164), Korea 2010.

PAL K., RAJASEKAR R., KANG D.J., ZHANG Z.X., PAL S.K., KIM J.K., DAS C.K. **Effect of fillers and nitrile blended PVC on natural rubber/high styrene rubber with nanosilica blends: Morphology and wear,** Elsevier Science – Materials and Design 31(25-34), Korea 2010.

PAL K., DAS T., RAJASEKAR R., PAL S.K., DAS S. **Wear Characteristics of Styrene Butadiene Rubber/Natural Rubber Blends with Varying Carbon Blacks by DIN Abrader and Mining Rock Surfaces,** Wiley InterScience – (348-357), India 2008.

PEDRONI L.G., ARAUJO J.R., FELISBERTI M.I., NOGUEIRA A.F. **Nanocomposites based on MWCNT and styrene–butadiene–styrene block copolymers: Effect of the preparation method on dispersion and polymer–filler interactions.** Composites Science and Technology 72, 1487–1492, Brasil 2012.

PEDRONI L.G., **Nanocompósitos elastoméricos baseados em MWCTNs: preparação, caracterização, e aplicações**. Campinas, 2009. Dissertação. Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas.

PETKEVICHIOUS S., SHPOKAS L., KUTZBACH H.-D, **Investigation of the maize ear threshing process**, Elsevier Science - Biosystems Engineering 99(532-539), Alemanha 2008.

RAMÔA, S.D.A.S., **Preparação e caracterização de compósitos de poliuretano termoplástico com negro de fumo condutor e nanotubos de carbono**, Florianópolis, 2011. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA.

RIBEIRO, D. M., CORRÊA, P. C., FURTADO, B. F., GONELI, A. L. D., RESENDE, O.. **Propriedades mecânicas dos grãos de soja em função do teor de água**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 27, n. 2, maio/ago. 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v27n2/a19v27n2.pdf>>. Acesso em: 14 nov. 2014.

RIBEIRO, B. **Obtenção e caracterização de compósitos nanoestruturados de poli (sulfeto de fenileno) reforçados com nanotubos de carbono**. 2015. 159 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ROBERTSON C.G., LIN C.J., RACKAITIS, ROLAND C.M., **Influence of Particle Size and Polymer-Filler Coupling on Viscoelastic Glass Transition of Particle-Reinforced Polymers**, 41, 2727-2731, 2008.

SAIEDIRAD M.H., TABATABAEEFAR A., BORGHEI A., MIRSALEHI M., BADI F., VARNAMKHAHASTI M.G., **Effects of moisture content, seed size, loading rate and seed orientation on force and energy required for fracturing cumin seed (Cuminum cyminum Linn.) under quasi-static loading**, Elsevier Science - Journal of food Engineering 86(565-572), Iran 2008.

SAFFAR A., SHOJAEI A., ARMAND M., **Theoretical and experimental analysis of the thermal, fade and wear characteristics of rubber-based composite friction materials**, Elsevier Science – Wear 269(145-151), Iran 2010.

SAFFAR A., SHOJAEI A., **Effect of rubber component on the performance of brake friction materials**, Elsevier Science – Wear 274-275(286-297), Iran 2012.

SHAH A.A., HASAN F., SHAH Z., KANWAL N., ZEB S., **Biodegradation of natural and synthetic rubbers: A review**, Elsevier Science – International Biodeterioration & Biodegradation 83(145-157), Pakistan 2013.

SCHANOSKI R., RIGHI E.Z., WERNER V. **Perdas na Colheita Mecanizada de Soja no município de Maripá – PR**, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.15, n.11, p.1206–1211, 2011

SUN Y., WAN M., WU X., **Friction coefficient in rubber forming process of Ti-15-3 alloy**. Science press – Trans. Nonferrous Met. Soc. China 22, 2952–2959, 2012.

TABSAN N., WIRASATE S., SUCHIVA K., **Abrasion behavior of layered silicate reinforced natural rubber**. Elsevier Science - Wear 269( 394-404), Thailand 2010.

TANAKA, Y., Sakdapipanich, J.T., **Chemical structure and occurrence of natural polyisoprene**. In: Koyama, T., Steinbüchel, A. (Eds.), Biopolymers. Polyisoprenoids, vol. 2. Wiley-VCH, Weinheim, Germany, pp. 1 e 25, 2001.

TANGUDOM P., THONGSANG S., SOMBATSOMPOP N., **Cure and mechanical properties and abrasive wear behavior of natural rubber, styrene–butadiene rubber and their blends reinforced with silica hybrid fillers**, Elsevier Science – Materials and Design 53(856 – 864), Thailand 2014.

TZOUNIS L., DEBNATH S., ROOJ S., FISCHER D., MÄDER E., DAS A., STAMM M., HEINRICH G., **High performance natural rubber composites with a hierarchical reinforcement structure of carbon nanotube modified natural fibers**, Elsevier Science – Materials and Design 58(1 – 11), Alemanha 2014.

VAUGHAN, C.E. The chlorox test (soybean). Quality assurance technique (Emphasis: Mechanical damage). In: **SHORT COURSE FOR SEEDSMEN**, 1982. Proceedings... Mississippi: Mississippi State University, p.117-118, 1982.

VINDIZHEV N L; Blaev V. V. Povrezhdaemostj semjan kukuruzy raznyh gibridov pri obmolote i puti ee snizhenija. [**Damage of maize grains different crossbreeds by threshing and ways for their reduction.**]. Materialy nauchnoj-prakticheskoi konferencii "Molodezhj, nauka, tehnika". Naljchik, 187–190, (1983).

XIAOYAN G., WANG L., ZHANG G., **Friction and wear behaviors of carbon-based multilayer coatings sliding against diferente rubbers in water environment**, Elsevier Science – Tribology International 64(69 – 77), China 2013.

ZAREIFOFOUSH H., KOMARIZADEH M.H., ALIZADEH M.R., **Effects of crop-machine variables on paddy grain damage during handling wth na inclined screw auger**, Elsevier Science - Biosystems Engineering 106(234-242), Iran 2010.

WACKER P., Bechaedigung von Maiskoernern bei der Getreideernte. [**Damage of maize grains by harvesting.**]. Landtechnik, 60(2), 84–85, 2005.

WANG, B., HUA MA J., WU, Y.P., **Application of artificial neural in predication abrasion**, Elsevier Science – Materials and Design 49(802-807), China 2013.

WERNER M., **Desenvolvimento de uma Bancada de Teste de Desgaste Abrasivo para Barras de Trilha de Colheitadeiras de Grão: Um Comparativo de Desempenho em Aços SAE 1045 e SAE 1518**. Porto Alegre. 2013. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

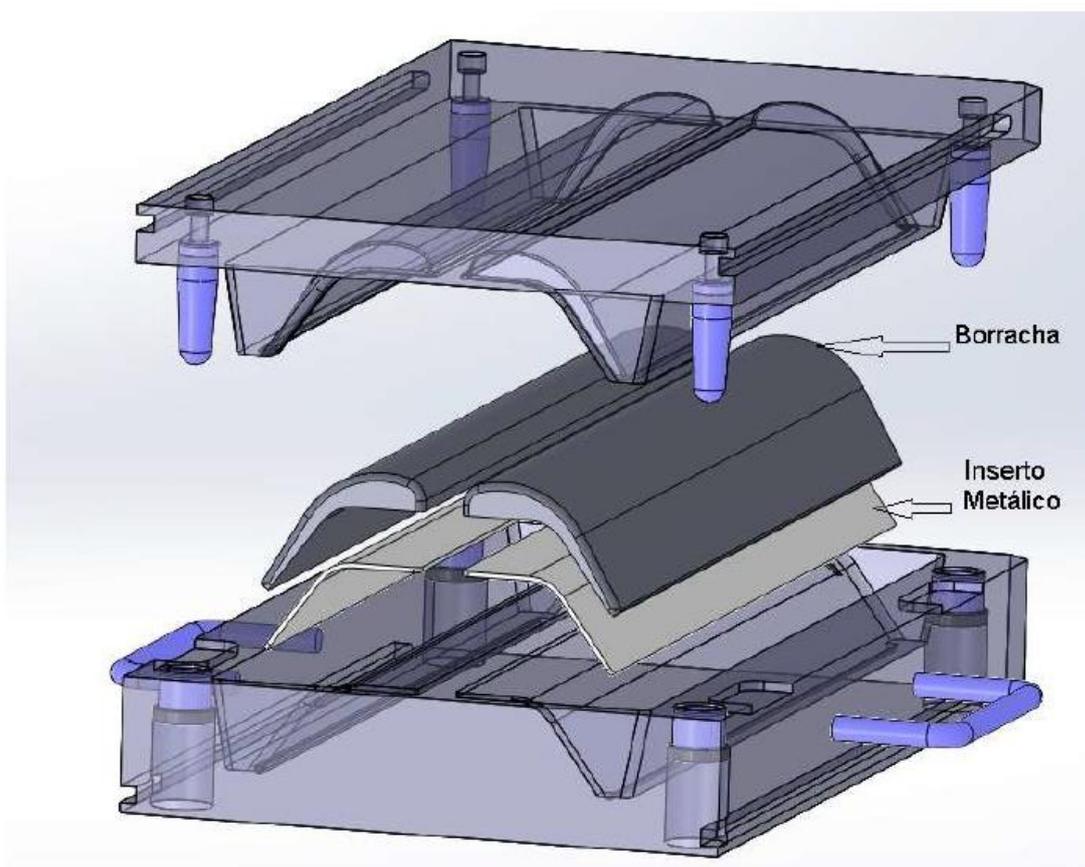
WERNER M., SCHERER M. AGCO do Brasil Comercio e Industria Ltda. (BR/RS). **Bancada de testes**. BR 10 2012 006068-0 A2. 1 out. 2013. Revista da Propriedade Industrial, Rio de Janeiro, n.2230, p.64.

WU W., TIAN L., **Formulation and morphology of kaolin-filled rubber composites**, Elsevier Science – Applied Clay Science 80-81(93-97), China 2013.

## ANEXO I – Projeto do Molde

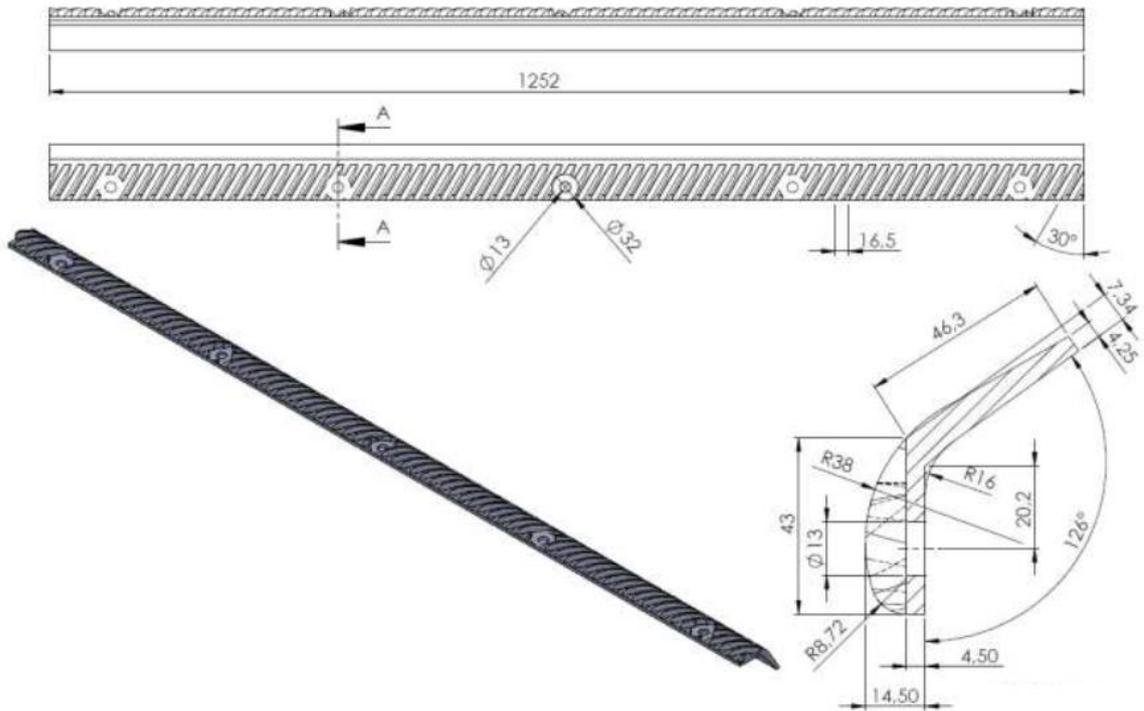


Processo de confecção do negativo do molde

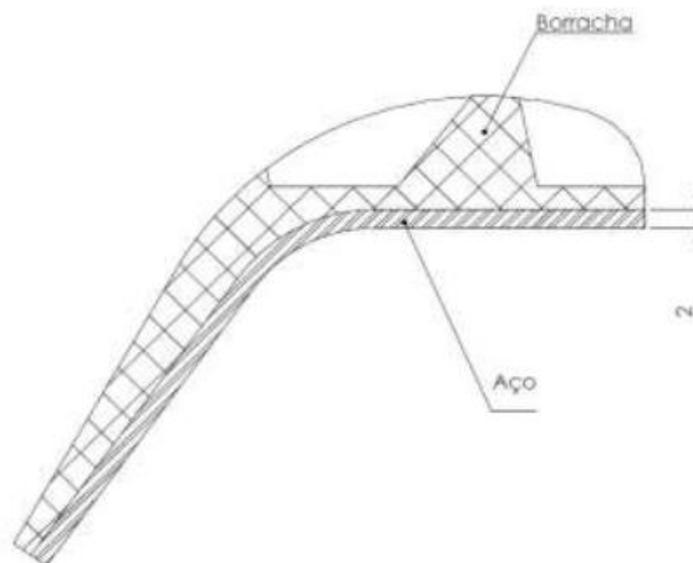


Desenho explodido do Molde com a alma metálica

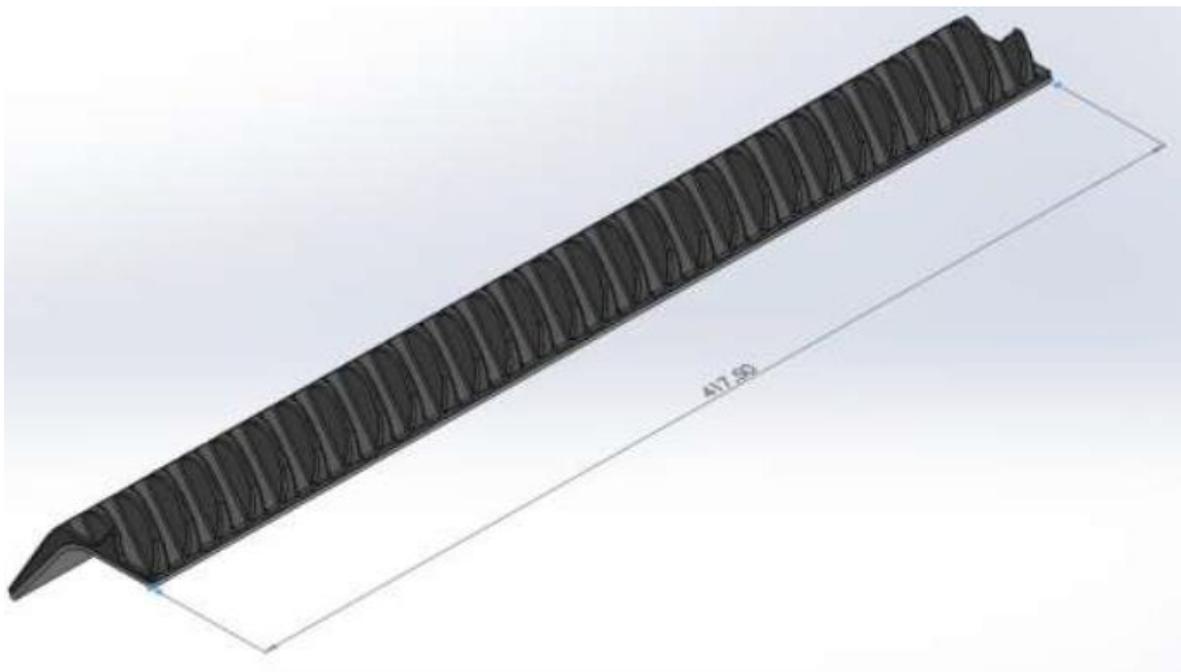
## ANEXO II – Projeto da peça/Inserto



Desenho da barra de trilha metálica redesenhada para elastômero



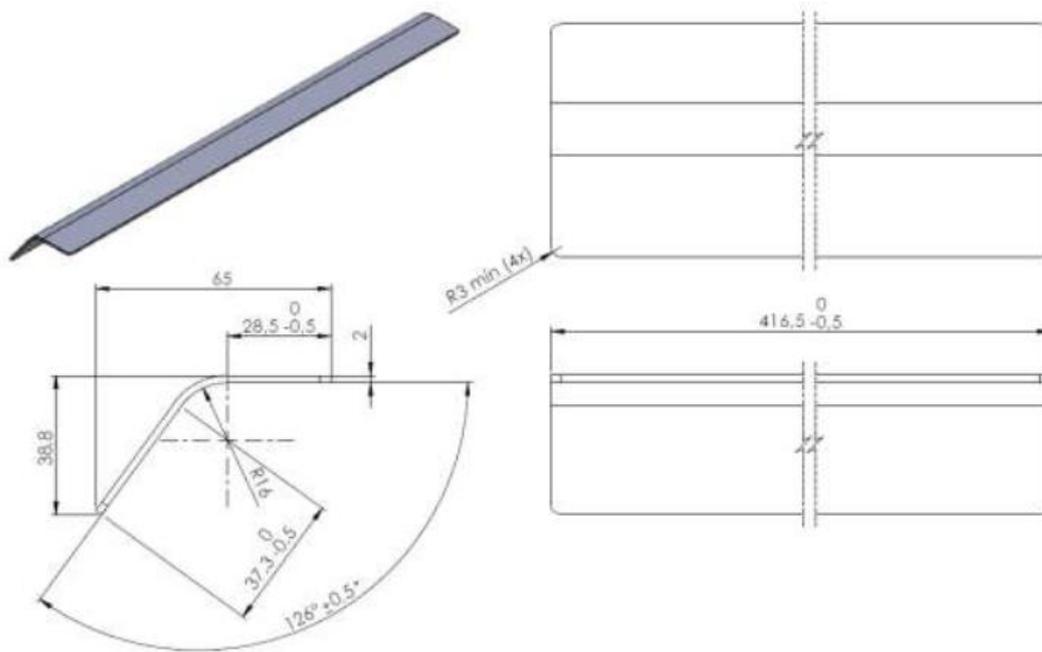
Desenho da barra elastomérica com o inserto metálico



Desenho da barra segmentada já no projeto final da composição elastomérica (à esquerda)



Desenho da barra segmentada já no projeto final da composição elastomérica (à direita)



Desenho do inserto metálico utilizado nas trilhas revestidas com borracha



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul  
Pró-Reitoria Acadêmica  
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 1 - 3º. andar  
Porto Alegre - RS - Brasil  
Fone: (51) 3320-3500 - Fax: (51) 3339-1564  
E-mail: [proacad@pucrs.br](mailto:proacad@pucrs.br)  
Site: [www.pucrs.br/proacad](http://www.pucrs.br/proacad)