



**CONFORME SOLICITAÇÃO DO AUTOR, ESTA
PRODUÇÃO INTELECTUAL POSSUI RESTRIÇÃO
DE ACESSO**

**CAXIAS DO SUL
2026**



UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
COORDENADORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS
MATERIAIS

ALANA RODRIGUES DA FONSECA

INFLUÊNCIA DOS AGENTES DE ADESÃO NA ADESÃO BORRACHA-METAL
EM PNEUS DE CARGA

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Janaina da Silva Crespo

CAXIAS DO SUL, 2026

Alana Rodrigues da Fonseca

INFLUÊNCIA DOS AGENTES DE ADESÃO NA ADESÃO BORRACHA-METAL
EM PNEUS DE CARGA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade de Caxias do Sul, visando à obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais, com a orientação da Prof^a. Dr^a. Janaina da Silva Crespo.

CAXIAS DO SUL, 2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
Sistema de Bibliotecas UCS - Processamento Técnico

F676i Fonseca, Alana Rodrigues da

Influência dos agentes de adesão na adesão borracha-metal em pneus de carga [recurso eletrônico] / Alana Rodrigues da Fonseca. – 2026.

Dados eletrônicos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, 2026.

Orientação: Janaina da Silva Crespo.

Modo de acesso: World Wide Web

Disponível em: <https://repositorio.ucs.br>

1. Ciência dos materiais. 2. Materiais - Testes. 3. Resistência de materiais. 4. Pneus - Indústria. 5. Elastômeros. 6. Adesão. 7. Borracha. I. Crespo, Janaina da Silva, orient. II. Título.

CDU 2. ed.: 678.4.063:620.179.4

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)
Ana Guimarães Pereira - CRB 10/1460

“INFLUÊNCIA DOS AGENTES DE ADESÃO NA ADESÃO BORRACHA-METAL
EM PNEUS DE CARGA”

Alana Rodrigues da Fonseca

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Caxias do Sul, 31 de março de 2026

Banca Examinadora:

Prof^ª. Dr^ª. Janaina da Silva Crespo
Orientadora

Prof^ª. Dr^ª. Gelsa Adriana Carpenedo
Borrachas Vipal S.A.

Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Cristian Padilha Fontoura
Universidade de Caxias do Sul

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura e componentes do pneu.....	8
Figura 2 – Formação do poli(cis-1,4-isopreno), borracha natural, a partir do isopreno: estrutura química da borracha natural.....	11
Figura 3 – Mecanismo de adesão do cordão de aço revestido com latão em composto contendo cobalto	13
Figura 4 – Teoria da Atração Eletrostática na Interface Polímero-Metal.....	14
Figura 5 – Formação de Ligações Cruzadas de Enxofre na Vulcanização da Borracha	16
Figura 6 – Representação das estruturas químicas dos sais de cobalto utilizados como agentes de adesão.	30
Figura 7 – Valores de torque mínimo (ML), torque máximo (MH), diferença de torque (ΔM) e viscosidade Mooney (ML 1+4 100°C) obtidos na reometria a 140°C para as formulações com diferentes sais de cobalto.	35
Figura 8 – Tempos de pré-vulcanização (t_2) e de cura (t_{90}), e índice de taxa de cura (CRI) obtidos na reometria a 140°C para as formulações com diferentes sais de cobalto.	37
Figura 9 – Valores de módulo a 50%, tensão na ruptura e alongamento na ruptura obtidos para as formulações com diferentes sais de cobalto.	42
Figura 10 – Valores de resistência ao rasgamento e <i>peeling mass</i> obtidos para as formulações com diferentes sais de cobalto.	45
Figura 11 – Adesão borracha-metal (pull-out) das formulações com diferentes sais de cobalto, sem envelhecimento e após 5 e 15 dias de envelhecimento acelerado.	47
Figura 12– MEV-FEG (250×) da superfície do cabo metálico após ensaio de pull-out para as formulações com o teor T1 nas condições não envelhecidas e com 5 e 15 dias após envelhecimento acelerado.	49
Figura 13 – Retenção da tensão na ruptura, alongamento na ruptura, módulo a 50% e resistência ao rasgamento após envelhecimento térmico.	55
Figura 14 – Retenção do <i>peeling mass</i> após envelhecimento.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição das Formulações Base 1.....	28
Tabela 2 – Sais de cobalto utilizados no sistema de adesão e teores aplicados.....	29
Tabela 3 – Valores de dureza, densidade e dispersão das formulações com diferentes sais de cobalto.	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

6PPD	<i>N</i> -(1,3-dimetilbutil)- <i>N'</i> -fenil- <i>p</i> -fenilenodiamina
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ANOVA	Análise de Variância
B1	Base 1
BC	Boroacilato de Cobalto
BR	Borracha de Butadieno
BY	Banbury
CAS	<i>Chemical Abstracts Service</i>
CRI	Índice de Taxa de Cura
DCBS	<i>N,N</i> -d ciclohexil-2-benzotiazolsulfenamida
EC	Estearato de Cobalto
ECM	Emborrachamento Cintura Metálica
EDS	Espectroscopia por Dispersão em Energia
MDR	<i>Moving Die Rheometer</i>
MEV-FEG	Microscopia Eletrônica de Varredura com Emissão de Campo
M_H	Torque Máximo
M_L	Torque Mínimo
NBC	Neodecanoato Borato de Cobalto

NC	Neodecanoato de Cobalto
NE	Não Envelhecido
NR	Borracha Natural
RCAIT	<i>Rubber Cord Adhesion Inflation Test</i>
RSS1	<i>Ribbed Smoked Sheet Grade 1</i>
SBR	Borracha de Estireno-Butadieno
SE	Sem Envelhecimento
T1	Teor 1
T2	Teor 2
T3	Teor 3
t₂	Tempo de Pré-Vulcanização
t₉₀	Tempo de Cura
TG	Temperatura de Transição Vítrea
TMQ	2,2,4-trimetil-1,2-di-hidroquinolina
ΔM	Diferença de Torque (MH-ML)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO GERAL	3
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3. REVISÃO DA LITERATURA	4
3.1. ESTADO DA ARTE NA ADESÃO BORRACHA-METAL EM PNEUS DE CARGA	4
3.1.2. Importância da Adesão Borracha-Metal em Pneus de Carga	5
3.2. LACUNAS DE PESQUISA E JUSTIFICATIVA	5
4. REFERENCIAL TEÓRICO	7
4.1. ESTRUTURA E COMPOSIÇÃO DOS PNEUS DE CARGA	7
4.1.1. Cintura Metálica	8
4.1.2. Componentes estruturais do pneu	9
4.2. INTRODUÇÃO AO CONTEXTO DA ADESÃO BORRACHA-METAL EM PNEUS DE CARGA	10
4.3. MECANISMOS DE ADESÃO BORRACHA-METAL	12
4.4. LIGANTES E ADITIVOS PARA MELHORIA DA ADESÃO	15
4.5. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO E TRATAMENTO SUPERFICIAL	15
4.5.1. Processos de Vulcanização e sua Influência na Adesão Borracha-Metal	15
4.5.2. Considerações sobre o Processo de Mistura e Formulação dos Compostos de Borracha	17
4.6. TESTES E MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DA INTERFACE BORRACHA-METAL	18
4.6.1. Ensaios para Avaliar a Adesão Borracha-Metal	18
4.6.2. Ensaio de Resistência à Tração	19
4.6.3. Envelhecimento Acelerado	19
4.6.4. Resistência à Umidade	19
4.6.5. Parâmetros de Desempenho em Condições Operacionais Severas	20
4.6.6. Análise Estatística dos Dados Experimentais	20
4.7. IMPACTO DO ENVELHECIMENTO E CONDIÇÕES AMBIENTAIS	20
4.7.1. Influência do Envelhecimento Térmico e Exposição a Fatores Ambientais	21
4.7.2. Estratégias para Reduzir a Degradação da Adesão em Ambientes Extremos	21

4.7.3.	Revisão de Estudos Recentes sobre Adesão Borracha-Metal	22
4.7.4.	Comparação com Inovações em Outras Indústrias que Utilizam Sistemas Adesivos Semelhantes	23
5.	METODOLOGIA	24
5.1	REAGENTES UTILIZADOS	24
5.2	PROCESSAMENTO DOS COMPOSTOS E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ENSAIOS	25
5.3	MÉTODOS DE ENSAIO E CONDIÇÕES DE ENVELHECIMENTO.	26
5.4	DEFINIÇÃO DAS FORMULAÇÕES E VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS	27
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
6.1	REOMETRIA – TORQUE MÍNIMO (ML), TORQUE MÁXIMO (MH), ΔM E VISCOSIDADE <i>MOONEY</i>	34
6.2	ANÁLISE DO TEMPO DE CURA (t_2 , t_{90}) E ÍNDICE DE TAXA DE CURA (CRI).....	36
6.3	PROPRIEDADES FÍSICO-ESTRUTURAIS DOS COMPOSTOS: DUREZA, DENSIDADE E DISPERSÃO.	38
6.4	PROPRIEDADES MECÂNICAS PARA AS FORMULAÇÕES COM DIFERENTES SAIS DE COBALTO.	41
7.	PERSPECTIVAS FUTURAS.....	61
8.	CONCLUSÃO	62
9.	REFERÊNCIAS	64
	ANEXO I - Análise estatística das propriedades dos compósitos por ANOVA (p-valores)	92
	ANEXO II - EDS da superfície do cabo metálico após ensaio de pull-out para as formulações com o teor T1 nas condições não envelhecidas e com 5 e 15 dias após envelhecimento acelerado.....	93
	Anexo III – Mapas de distribuição elementar por EDS da superfície do cabo metálico após ensaio de pull-out para as formulações com teor T1 nas condições não envelhecidas e após 5 e 15 dias de envelhecimento acelerado.	95

RESUMO

A adesão entre borracha e cordões metálicos é um fator determinante para o desempenho e a durabilidade de pneus de carga, especialmente em aplicações submetidas a elevadas solicitações mecânicas e térmicas. Nesse contexto, os sais de cobalto atuam como agentes de adesão fundamentais, influenciando a formação da interface borracha-metal e a estabilidade da rede elastomérica ao longo do tempo. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de diferentes sais de cobalto, com distintas estruturas químicas, tipos de ligantes e teores de Co^{2+} , sobre as propriedades reológicas, mecânicas e de adesão de compostos de borracha natural aplicados à região da cintura metálica de pneus de carga. Foram estudados sais de cobalto baseados em neodecanoato borato de cobalto (NBC), boroacilato de cobalto (BC), neodecanoato de cobalto (NC) e estearato de cobalto (EC), em três teores distintos de Co^{2+} , além de uma formulação padrão industrial para a cintura metálica (ECM_Padrão) e de uma formulação sem adição de cobalto (Branco). As formulações foram caracterizadas por ensaios de reometria, viscosidade *Mooney*, resistência a tração, dureza, densidade, dispersão, resistência ao rasgamento, *peeling mass* e adesão. Algumas propriedades foram avaliadas antes e após envelhecimento em estufa a 85°C por 7 dias, com o objetivo de analisar a estabilidade dos compostos sob exposição térmica. A adesão borracha-metal foi avaliada antes e após envelhecimento acelerado em câmara climática, conduzido a 85°C e 90% de umidade relativa, nos períodos de 5 e 15 dias. Os resultados mostraram que a presença dos sais de cobalto promoveu aumento da rigidez inicial dos compostos e alterações significativas no comportamento mecânico e adesivo quando comparados à formulação sem cobalto. As diferenças observadas entre os sistemas estiveram associadas principalmente à estrutura química dos sais e à polaridade dos ligantes, bem como à presença de grupos borato, que influenciam a cinética de liberação do Co^{2+} e a uniformidade da rede de ligações cruzadas. Após o envelhecimento térmico, verificou-se redução da capacidade de deformação e da adesão superficial em todas as formulações, embora com intensidades distintas, indicando diferentes níveis de estabilidade da interface borracha-metal conforme o tipo de sal e o teor de cobalto empregado. Os resultados indicam que a escolha do sistema de sal de cobalto exerce papel central no equilíbrio entre rigidez, resistência mecânica e desempenho adesivo, tanto em condição inicial quanto após envelhecimento térmico.

Palavras-chave: adesão borracha-metal; sais de cobalto; pneus de carga; envelhecimento acelerado.

ABSTRACT

Adhesion between rubber and steel cords is a determining factor for the performance and durability of truck tires, particularly in applications subjected to high mechanical and thermal stresses. In this context, cobalt salts act as essential adhesion promoters, influencing the formation of the rubber–metal interface and the stability of the elastomeric network over time. Thus, the objective of this study was to evaluate the influence of different cobalt salts, with distinct chemical structures, ligand types, and Co^{2+} contents, on the rheological, mechanical, and adhesion properties of natural rubber compounds applied to the steel belt region of truck tires. Cobalt salts based on cobalt boron neodecanoate (NBC), cobalt boroacylate (BC), cobalt neodecanoate (NC), and cobalt stearate (EC) were investigated at three different Co^{2+} contents, in addition to an industrial standard formulation for the steel belt region (ECM_Standard) and a formulation without cobalt addition (Blank). The formulations were characterized through rheometry, Mooney viscosity, tensile strength, hardness, density, dispersion, tear resistance, *peeling mass*, and adhesion tests. Some properties were evaluated before and after aging in an oven at 85°C for 7 days in order to analyze the stability of the compounds under thermal exposure. Rubber–metal adhesion was evaluated before and after accelerated aging in a climatic chamber conducted at 85°C and 90% relative humidity for periods of 5 and 15 days. The results showed that the presence of cobalt salts promoted an increase in the initial stiffness of the compounds and significant changes in mechanical and adhesive behavior when compared to the cobalt-free formulation. The differences observed among the systems were mainly associated with the chemical structure of the salts and the polarity of the ligands, as well as the presence of borate groups, which influence the Co^{2+} release kinetics and the uniformity of the crosslink network. After thermal aging, a reduction in deformation capacity and surface adhesion was observed in all formulations, although with different intensities, indicating different levels of stability of the rubber–metal interface depending on the type of salt and the cobalt content employed. The results indicate that the choice of the cobalt salt system plays a central role in balancing stiffness, mechanical strength, and adhesive performance, both in the initial condition and after thermal aging.

Keywords: rubber–metal adhesion; cobalt salts; truck tires; accelerated aging.