

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

**ESTUDO DA RETICULAÇÃO E PROPRIEDADES
MECÂNICAS DA BLEND A CM/CR**

PEDRO ZANGROSSI DE SOUZA

SÃO CARLOS -SP
2024

ESTUDO DA RETICULAÇÃO E PROPRIEDADES MECÂNICAS DA BLEND A CM/CR

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia de Materiais da
Universidade Federal de São Carlos,
como requisito para obtenção do
título de bacharel em Engenharia de
Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique
Scuracchio

São Carlos-SP
2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
Telefones: 16 –3351-8244 e 3351-8246
Endereço eletrônico: demachef@ufscar.br
Rodovia Washington Luís, km 235 – Caixa Postal 676
CEP 13565-905 – São Carlos – SP - Brasil



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

NOME: Pedro Zangrossi de Souza

RA: 627771

TÍTULO: Estudo da reticulação e propriedades mecânicas da blenda CM-CR

ORIENTADOR(A): Prof. Dr. Carlos Henrique Scuracchio

CO-ORIENTADOR(A):

DATA/HORÁRIO: 06/09/2024, 11h30

BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Carlos Henrique Scuracchio	8,0	9,0
Prof. Dr. Rafael Barbosa	8,0	9,0
Média	8,0	9,0

BANCA – ASSINATURAS:

Prof. Dr. Carlos Henrique Scuracchio

Documento assinado digitalmente
gov.br CARLOS HENRIQUE SCURACCHIO
Data: 12/09/2024 13:29:17-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Rafael Barbosa

Documento assinado digitalmente
gov.br RAFAEL BARBOSA
Data: 12/09/2024 13:43:37-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

AGRADECIMENTO

Ao professor doutor Carlos Scuracchio, pela sua atenção, disponibilidade, e valiosa orientação.

À Parolabor, pelos recursos materiais, de tempo, e humanos investidos, sem os quais o trabalho não teria sido possível.

Aos senhores Luis Eduardo e Luciano Vicente, pela generosidade em compartilhar seus conhecimentos e experiência.

Ao Luis Eduardo, supervisor na empresa, pelo forte entusiasmo e presença ao longo de todo o trabalho.

RESUMO

Foram estudadas as propriedades mecânicas da blenda elastomérica de polietileno clorado (CM) e policloropreno (CR) nas proporções CM:CR 90:10, 70:30, 50:50, 30:70 e 10:90, respectivamente denominadas A, B, C, D e E. A formulação das blendas foi desenvolvida visando minimizar quaisquer variáveis além dos teores dos polímeros, garantir a viabilidade de aplicação industrial em escala e curto prazo, e garantindo propriedades necessárias para atender normas automotivas.. A escolha do tipo e do teor do peróxido permitiu adequar todas as amostras numa mesma especificação e atingir os objetivos propostos.

As amostras foram preparadas em duas etapas de mistura, primeiro em misturador fechado e depois em aberto, de forma a igualar o histórico de processamento. A utilização do mesmo sistema de cura garantiu diferença de cerca de 10% no t50 e t90 em todas as proporções de polímeros. A vulcanização completa foi atingida em menos de 2,5 minutos.

A dureza, tensão de ruptura, alongamento e resistência ao rasgo aumentaram conforme o aumento do teor do CM. O módulo elástico e o custo aumentaram no sentido contrário.

Palavras-chave: Policloropreno. CR. Polietileno clorado. CM. CPE. Blenda. Peróxido. Borracha.

ABSTRACT

The mechanical properties of the chlorinated polyethylene (CPE) and polychloroprene rubber (CR) blend were studied in the 90:10, 70:30, 50:50, 30:70 and 10:90 CM:CR ratios. The blend formulation was designed to minimize any variables other than the polymer ratio, to be a viable short-term application in industrial scale, and to ensure necessary properties to fulfill specifications for automotive standards. The choice of peroxyde type and content allowed all blend ratios to meet the same specification and proposed objectives.

Samples were prepared in two mixing steps, first in a closed mixer and then in an open mixer, in a way to ensure equal processing history for all blend ratio samples. The use of a single, fixed content curing system in all blend ratios resulted in around 10% difference between the t₅₀ and t₉₀ times for all samples, each. Complete vulcanization was achieved in less than 2,5 minutes. Hardness, tensile strength, elongation at break increased as the CPE content increased. Modulus at 300% and cost increased in the opposite direction.

Keyword: Chlorinated polyethylene. CPE. Polychloroprene. CR. Rubber. Blend. Peroxide

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Tabela 1. Formulação das blendas CM/CR	04
Figura 1 e 2. Representações do 1,1-di(terc-butilperoxi)-3,3,5-trimetil ciclohexano	20
Figura 3. Curva reométrica da primeira versão da Blenda A (90CM:10CR).	21
Figura 4. Curva reométrica da primeira versão da Blenda E (10CM:90CR).	21
Tabela 2. Dados de reometria e tração da primeira versão blendas A e E	21
Tabela 3: Ordem de adição e parâmetros de mistura.	23
Figura 5. Curômetro TI-100.	26
Figura 6. Durômetro Shore A digital.	26
Figura 7. Extensômetro LRX da LLOYD Instruments.	27
Figura 8. Mapeamento das seções do molde de transferência.	28
Tabela 4. Mapa de teste de moldagem por transferência.	29
Gráfico 1. Comparativo da reometria das amostras de blendas a 175°C.	30
Gráfico 2. Comparativo da reometria das amostras de blendas a 160°C.	30
Tabela 5. Dados de reometria das amostras de blenda a 160°C e 175°C.	31
Tabela 6. Propriedades Mecânicas das amostras de Blendas.	31
Gráfico 3. Dureza e tensão de ruptura das blendas conforme teor de CR.	32
Gráfico 4. Custo e Módulo 300% das amostras de blendas conforme teor de CR.	32
Gráfico 5. Alongamento na ruptura e resistência ao rasgamento de blendas conforme teor de CR.	32
Figura 9. Foto do painel da câmara de ozônio durante ensaio com parâmetros controlados.	33
Tabela 7. Parâmetros e resultados do ensaio de resistência ao ozônio.	34
Figura 10. Teste de produção em molde de transferência.	35
Tabela 8. Resultados do teste de produção em molde de transferência.	35

LISTA DE ABREVIATURAS

CM	Borracha de polietileno clorado
CR	Borracha de policloropreno / Neoprene
TOTM	
TETD	

LISTA DE SIGLAS

CM Borracha de polietileno clorado
CR Borracha de policloropreno / Neoprene
SIGLA - Nome por extenso
SIGLA - Nome por extenso
SIGLA - Nome por extenso
SIGLA - Nome por extenso
SIGLA - Nome por extenso
SIGLA - Nome por extenso

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	7
SUMÁRIO	10
1 INTRODUÇÃO	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1. POLICLOROPRENO (CR)	12
2.2. POLIETILENO CLORADO (CM/CPE)	12
2.3. RETICULAÇÃO POR PERÓXIDO	13
2.4. BLENDS ELASTOMÉRICAS	13
3 MATERIAIS E MÉTODOS	14
3.1 FORMULAÇÃO	14
3.1.1 Matérias Primas	16
3.1.1.1 CM e CR	16
3.1.1.2 Taiflux-SPE	17
3.1.1.3 Negro de Fumo	17
3.1.1.4 TOTM	17
3.1.1.5 Óxido de Magnésio	18
3.1.1.6 Cera Antiozonante	18
3.1.1.7 Hidróxido de Cálcio	18
3.1.1.8 TA-70	19
3.1.1.9 TETD	19
3.1.1.10 Peróxido	19
3.1.2 Testes Preliminares	20
3.1.2.1 Ponto de partida	20
3.1.2.2 Ajuste	22
3.2 MISTURA	22
3.2.1 Masterbatches	23
3.2.2 Mistura entre Masterbatches	24
3.3 ENSAIOS	24
3.3.1 Reometria	24
3.3.2 Dureza	25
3.3.3 Tensão e Alongamento na Ruptura	26
3.3.4 Resistência ao Rasgamento	26
3.3.5 Módulo 300%	26
3.3.6 Resistência ao Ozônio	27
3.4 TESTE EM PROCESSO	27
4 RESULTADOS	28
4.1 REOMETRIA	28
4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS	30
4.3 RESISTÊNCIA AO OZÔNIO	32

4.3 PROCESSABILIDADE	33
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	34
5.1 REOMETRIA	34
5.2 DUREZA	34
5.3 TENSÃO E ALONGAMENTO DE RUPTURA	35
5.4 RESISTÊNCIA AO RASGAMENTO	35
5.5 MÓDULO 300%	35
5.6 PROCESSABILIDADE	35
6 CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
REFERÊNCIAS	38
APÊNDICE A - Dados completos dos ensaios	39

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de blendas elastoméricas é uma tendência crescente. A obtenção de propriedades intermediárias que a formulação de blendas permite em relação aos polímeros puros se apresenta como uma estratégia flexível e potencialmente vantajosa. No entanto, envolve desafios como garantir boa compatibilidade entre os polímeros, aumento na complexidade da formulação, do procedimento de mistura e no controle dos processos produtivos.

Apesar do crescente número de estudos no assunto de blendas, os conhecimentos científicos na área de materiais ainda estão distantes das aplicações atuais na indústria. Promover a aproximação dos dois através do desenvolvimento de tecnologias de fácil implementação é um papel importante dos engenheiros de materiais.

Nesse cenário, foi estudada a blenda de polietileno clorado (CM) e policloropreno (CR), para obter materiais viáveis para aplicação na fabricação de artefatos para indústria automotiva, combinando a boa resistência à oxidação de cada uma, adequando todas proporções de blendas numa mesma especificação de dureza, e testando seu desempenho em processo.

Zhang et al. (2014)¹ estudou esta blenda numa formulação minimalista, com sistema de cura dual, e mostrou que CM e CR são parcialmente miscíveis e que a morfologia dessa blenda é de natureza heterogênea.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. POLICLOROPRENO (CR)

A borracha de policloropreno, usualmente conhecida como neoprene ou CR, é uma borracha sintética produzida pela polimerização, por radicais livres, do cloropreno. Foi inventado pela empresa DuPont na década de 1930, apresenta boa estabilidade química e mantém sua flexibilidade em uma faixa ampla de temperatura. Sua estrutura de cadeia regular promove cristalização sob tensão, levando a altas tensões de ruptura.

O policloropreno forma ligações cruzadas diferentemente de outras borrachas de dieno pois a eletronegatividade do seu átomo de cloro inibe a reação de substituição eletrofílica comum em polímeros insaturados². É normalmente reticulado por óxido de zinco junto com óxido de magnésio e utilizando ETU como acelerador. A formação de ligações cruzadas também pode ser realizada com uma variedade de outros óxidos metálicos, como óxido de ferro I e II, óxido de estanho II, óxido de cobre I e II, conforme verificado por *Olejnik et al.* (2019)³.

2.2. POLIETILENO CLORADO (CM/CPE)

A borracha de polietileno clorado (CM) é uma variação de baixo custo do

polietileno, onde o cloro substitui alguns átomos de hidrogênio. O conteúdo de cloro varia de cerca de 34% a 44%.

Devido a saturação da cadeia polimérica, a reticulação e formação de ligações cruzadas necessárias para que se torne um elastômero é feita por peróxidos.

Além do baixo custo, apresenta baixa flamabilidade e boa resistência ao ozônio. Industrialmente pode ser usado para a fabricação de revestimento de cabos.

2.3. RETICULAÇÃO POR PERÓXIDO

A maioria dos elastômeros pode ser reticulada por peróxidos, e geralmente são utilizados quando o elastômero não apresenta sítios de reação adequados para outros tipos de agentes de cura. O peróxido de dicumila é o mais conhecido e utilizado, mas apresenta odor forte e característico às vezes indesejado. Há vários tipos de peróxidos para reticulação de elastômeros, que se diferenciam pelas cadeias à eles ligadas, que ocasionam diferentes temperaturas de decomposição e energias de ligação, afetando as propriedades finais do material.

Componentes ácidos na formulação podem catalisar a decomposição do peróxido sem formar radicais úteis para a reticulação, e o uso de anti-degradantes pode reduzir a eficiência da formação de ligações cruzadas pela alteração do radical antes que ele interaja com o polímero.

Geralmente, as propriedades mecânicas de elastômeros curados por peróxidos são inferiores quando comparadas com sistemas de cura à base de enxofre, mas podem ser desejáveis quando a aplicação exige melhor resistência ao envelhecimento e menor deformação permanente.

Peróxidos são uma alternativa para a vulcanização de polímeros saturados, no entanto a ramificação da cadeia pode reduzir a eficiência da reação e ocasionar outras reações onde os radicais peroxídicos são consumidos em reações não produtivas, sem a formação de ligações cruzadas, por exemplo causando cisão da cadeia. Em polímeros insaturados derivados de butadieno ou isoprene, após a decomposição do peróxido em radicais livres o próximo passo da reação é ou a abstração de um átomo de hidrogênio de uma posição alílica na molécula do polímero ou a adição do radical na ligação dupla².

O uso de coagentes em conjunto com peróxidos pode afetar significativamente a vulcanização e as propriedades finais. São usados tanto para aumentar a resistência a scorch, facilitando processos de conformação por injeção, quanto para favorecer alguns mecanismos de reação que promovem maior eficiência na formação de ligações cruzadas.

2.4. BLENDA ELASTOMÉRICAS

A criação de blendas elastoméricas é uma alternativa factível e frequentemente praticada para atingir propriedades intermediárias entre os

polímeros misturados. Essas propriedades geralmente podem ser atingidas por um único material desenvolvido para tal finalidade, mas além da desvantagem em termos de custo e requerir novas matérias primas e procedimentos, o ajuste da proporção dos elastômeros na blenda permite obter uma variação contínua das propriedades.

No ambiente industrial a criação de blendas é uma estratégia vantajosa e amplamente utilizada pois parte da ideia simples de misturar dois materiais já prontos, mas essa simplicidade devido a necessidade de evitar reações secundárias indesejáveis na formação da blenda, tal como a redistribuição de cargas e agentes de cura.

As blendas elastoméricas são comumente caracterizadas quanto à miscibilidade dos seus componentes e a distribuição das fases presentes. Pelo estudo das curvas de calorimetria diferencial de varredura, Zhang et al. (2014)¹ concluiu que a blenda CM/CR é parcialmente miscível pela aproximação da temperatura de transição vítrea nas proporções de blenda em relação aos polímeros puros, mas ainda com duas temperaturas distintas.

Quanto à distribuição de fases, Zhang et al. (2014)¹ também concluiu em seu estudo que há inversão de fases na blenda CM/CR conforme o teor dos polímeros, e contrário ao que geralmente ocorre, o polímero menos viscoso formar uma matriz contínua em uma ampla faixa de composição, o CM, que era mais viscoso, se tornou a fase predominante e contínua quando seu teor era da ordem de 50%.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 FORMULAÇÃO

A formulação final definida para o estudo das blendas é resultado de um processo iterativo de desenvolvimento que envolveu vários testes preliminares tanto para a escolha dos ingredientes quanto para seus teores, visando permitir analisar o efeito da variação dos polímeros nas propriedades minimizando quaisquer outras variáveis.

Mas, além disso, também com o requisito de ser aplicável em escala industrial, em curto prazo, e que todos os compostos se enquadrem em uma mesma

especificação de norma automotiva. Isso se traduz em garantir boa processabilidade na mistura (evitar dificuldade e complexidade), uso de matérias primas facilmente acessíveis, alta produtividade (minimizar tempo de vulcanização, e temperatura no molde), boa processabilidade na moldagem (baixa adesão e sujidade no molde), qualidade (controle de defeitos) e propriedades (dureza de 50 ± 5 ShA e a tensão de ruptura acima de 10 MPa).

A formulação final das blendas estudadas está apresentada na tabela abaixo. Todos os teores em *phr*.

Tabela 1. Formulação das blendas CM/CR.

Matéria Prima	Blenda A	Blenda B	Blenda C	Blenda D	Blenda E
CM	90	70	50	30	10
CR	10	30	50	70	90
Taiflux-SPE	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
N772	15	15	15	15	15
TOTM	10	10	10	10	10
MgO	10	10	10	10	10
Cera Antiozonante	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
TA70	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Ca(OH) ₂	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
TETD	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Peróxido	7	7	7	7	7

Definiu-se estudar as blendas CM:CR nas proporções 90:10, 70:30, 50:50, 30:70 e 10:90, dando origem aos compostos denominados A, B, C, D e E, respectivamente.

A presença do TETD e a seleção do peróxido, e seus respectivos teores, foram os principais mecanismos de ajuste que possibilitaram atender simultaneamente os dois objetivos, e serão explicados em detalhes mais adiante.

3.1.1 Matérias Primas

A parceria da Parolibor foi fundamental para a realização do estudo, tanto na disponibilização das matérias primas já em estoque quanto na aquisição de novos *grades* e amostras com os fornecedores homologados.

Apesar de que outras matérias primas especiais poderiam ter sido vantajosas para o desempenho da blenda, a proximidade com os insumos cotidianamente utilizados na indústria está alinhada com os objetivos deste trabalho.

3.1.1.1 CM e CR

O CM utilizado para o estudo das propriedades das blendas foi o *grade* 352L, de origem chinesa. Apresenta cadeia ramificada e têm as seguintes características garantidas pelo fabricante:

Conteúdo de Cloro [%]	35,93
Dureza [ShA]	46
Resistência à Tração [MPa]	11,53
Alongamento de Ruptura [%]	759
Viscosidade Mooney ^(ML121°C 1+4)	54

Já o CR, *grade* WRT, é fabricado nos Estados Unidos. Este *grade* apresenta menor cristalinidade em relação aos outros, e têm as seguintes características garantidas:

Teste	Método de Teste	Resultado
ML100	N200.5700	46 min.
ML120	N200.7460	13,49 min.

A escolha dos polímeros é fundamental dado que a variação de seus teores é a variável principal do estudo.

A fim de promover maior compatibilidade entre os polímeros e consequentemente menor heterogeneidade na matriz das diferentes blendas, foram escolhidos estes *grades* pois apresentaram a menor diferença de viscosidade entre as opções disponíveis.

3.1.1.2 Taiflux-SPE

O produto Taiflux-SPE da MAGMA-MIX foi adicionado na formulação como um aditivo multifuncional no processamento. De acordo com o fabricante, atua como lubrificante interno e externo, plastificante, compatibilizante e dispersante. É um éster parcial de poliol cuja ação independe do sistema de reticulação e pode ser aplicado numa grande variedade de elastômeros.

3.1.1.3 Negro de Fumo

Escolheu-se o N772 para a função de carga reforçante no estudo das blendas, porque sua menor área superficial, e conseqüentemente menor efeito reforçante, permitem a adição de uma quantidade maior desta matéria-prima, comparado à outro de maior área superficial. A maior quantidade promove redução de custo, e o menor efeito de reforço facilita atingir a dureza em torno de 50 ShA, comumente desejada para peças para o setor automotivo.

As seguintes especificações são garantidas pelo fabricante:

Característica	Resultado	Método
Nº Adsorção de lodo	31,00 g/kg	ASTM D1510
Transmitância a 425nm	93,70 %	ASTM D1618
Superfície Específica - BET	31,90 m ² /g	ASMT D6556
Distribuição Normal log	1,50	ASTM D1511

3.1.1.4 TOTM

Como óleo plastificante, para melhorar a processabilidade do material, utilizou-se o TOTM (Tri(2-ethylhexyl)trimellitate), de origem chilena. Escolha devida à compatibilidade esperada com os polímeros clorados. Apresenta as seguintes características:

Característica	Resultado	Método
Acidez	0,05 mgKOH/g	ASTM D1045
Volatilidade	0,05 %m/m	Gravimetria
Conteúdo de Ésteres	99,98 %m/m	Cromatografia

Teor de Umidade	0,04 %m/m	ASTM E203
-----------------	-----------	-----------

3.1.1.5 Óxido de Magnésio

Nesta formulação, o óxido de magnésio têm uma função importante, além de atuar como carga de preenchimento. Os polímeros clorados, em altas temperaturas, degradam, com a quebra da ligação do cloro, formando ácido. A presença do óxido de magnésio controla a formação do ácido, ajudando a manter o pH estável de forma que não impacte negativamente na cura da borracha.

Apresenta as seguintes características:

Característica	Resultado
Teor MgO	93,14 %
Área Superficial - BET	135 m ² /g
Retido em Malha 325	0,34 %
Densidade Aparente	0,22 g/cm ³
Densidade Compactada	0,33 g/cm ³

3.1.1.6 Cera Antiozonante

A resistência ao ozônio é uma qualidade importante para o setor automotivo, e embora espera-se que os polímeros clorados apresentem boa resistência por si só, a adição deste aditivo facilita a aprovação em ensaios em condições mais rigorosas.

Também, o fato da cera migrar para a superfície do composto tem efeito positivo na processabilidade, reduzindo a adesão do material após a conformação. Como especificação, o fabricante fornece a informação do ponto de amolecimento: 63°C.

3.1.1.7 Hidróxido de Cálcio

A pequena quantidade de hidróxido de cálcio nesta formulação tem a função de capturar os gases formados no composto durante a cura. Essa função é especialmente importante para o processamento de peças curadas por peróxidos, reduzindo a ocorrência de defeitos, uma vez que os gases livres podem formar bolhas que comprometem a qualidade do produto.

A matéria prima utilizada apresenta as seguintes características:

Característica	Resultado
Teor CaO Total	75,60 %
Teor Ca(OH) ₂	97,94 %
Granulometria #325	<1,00 %
Umidade	<1,00 %

3.1.1.8 TA-70

Em sistemas de cura peroxídica, há reações secundárias, indesejadas, como a cisão de cadeia e a ligação improdutiva entre dois radicais. A escolha de um coagente adequado pode melhorar a eficiência da formação de ligações cruzadas e consequentemente as propriedades do elastômero. Neste estudo foi escolhido o TAIC, trialil isocianurato, coagente tipo 2, para compor a formulação. O produto comercial utilizado apresenta 70% em peso do princípio ativo.

3.1.1.9 TETD

O dissulfeto de tetraetiltiuram é usualmente utilizado como acelerador em formulações com sistema de cura com enxofre, mas, no caso um sistema de cura com peróxidos, sua função é diferente. Nesse caso, o TETD teve efeito na cura: interagiu com o peróxido de forma a reduzir o grau de reticulação. Supõe-se que devido à afetar a decomposição do peróxido..

O efeito do TETD na reação de reticulação foi mais intenso no CR do que no CM, e utilizou-se o conhecimento empírico deste efeito como mecanismo de controle para assemelhar o comportamento da reação dos polímeros, o que possibilitou atingir as propriedades.

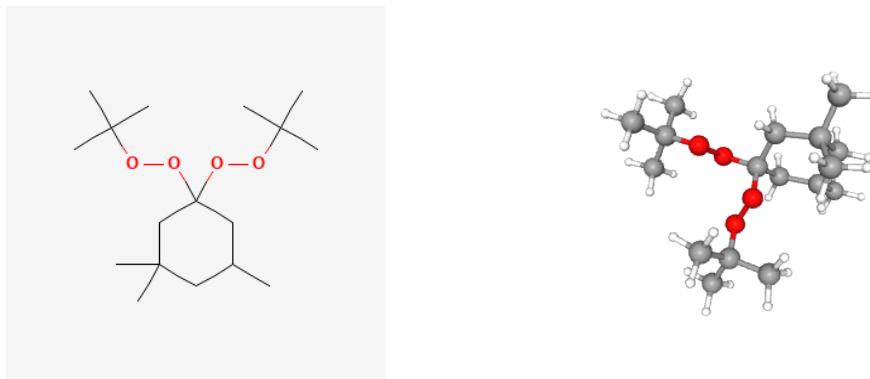
3.1.1.10 Peróxido

A escolha de um único peróxido como agente de cura para todas as blendas foi impulsionada pela constatação de uma tendência na indústria, de aumento das restrições de alguns compostos utilizados nos sistemas de cura tradicionais. Também, no caso desta blenda em específico, CM:CR, o conjunto de óxido de zinco com ácido esteárico, normalmente utilizado para a cura do CR, causa forte impacto negativo nas propriedades de envelhecimento devido a continuidade da atividade do zinco presente no composto.

Assim, os peróxidos se apresentam como uma alternativa para contornar esses problemas, e simplificam a formulação. Em contrapartida, a reticulação por

radicais peroxídicos é mais difícil de ser controlada e requer atenção quanto a temperatura de decomposição.

O peróxido utilizado foi o 1,1-di(terc-butilperoxi)-3,3,5-trimetil ciclohexano, cuja estrutura molecular pode ser representada conforme as imagens:



Figuras 1 e 2. Representações do 1,1-di(terc-butilperoxi)-3,3,5-trimetil ciclohexano. Fonte: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/93038>

Apresenta as seguintes características garantidas pelo fornecedor:

Peso molecular	302,4 g
Oxigênio ativo	10,58 %
Tempo de Meia Vida à 160°C	1 minuto
Princípio ativo	40 w%

3.1.2 Testes Preliminares

Antes de definir a formulação final das blendas, foram necessários alguns testes para garantir o objetivo de aplicação industrial em escala em curto prazo e de atender normas automobilísticas.

3.1.2.1 Ponto de partida

Inicialmente, pretendia-se utilizar o peróxido de dicumila. Por ser o mais simples dos peróxidos orgânicos, há maior quantidade de estudos e referências quanto a sua aplicação, e é mais barato em relação aos outros peróxidos.

A seguir, as curvas reométricas das primeiras versões das blendas A e E, ambas contendo o mesmo teor de peróxido de dicumila.

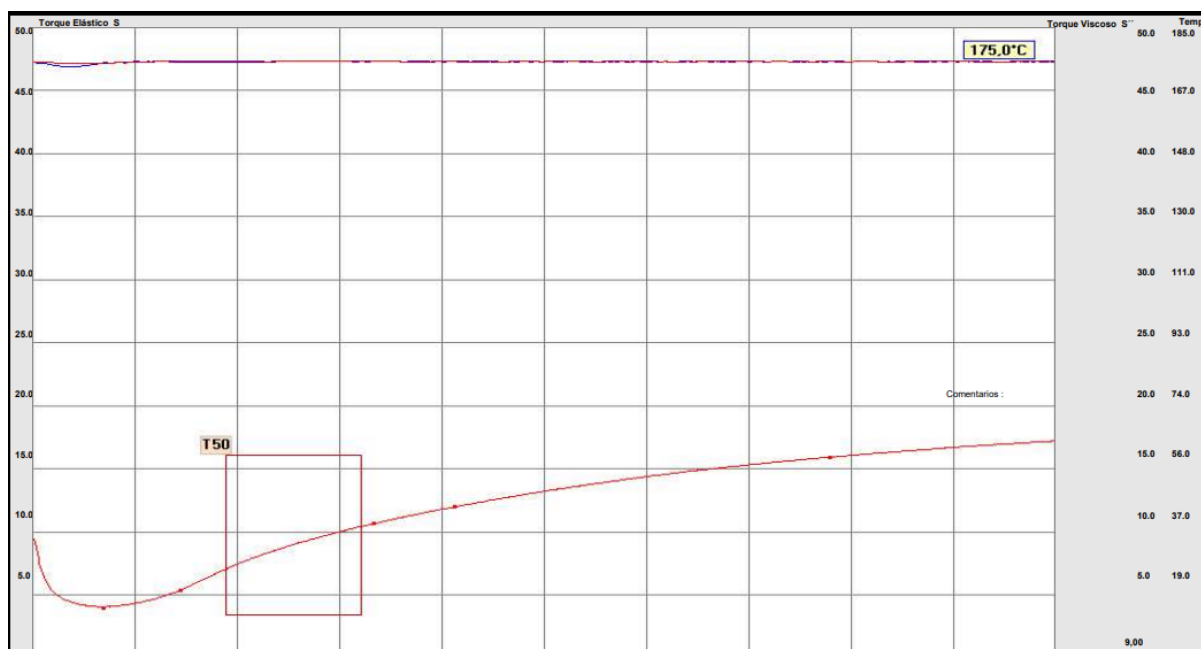


Figura 3. Curva reométrica da primeira versão da Blenda A (90CM:10CR).

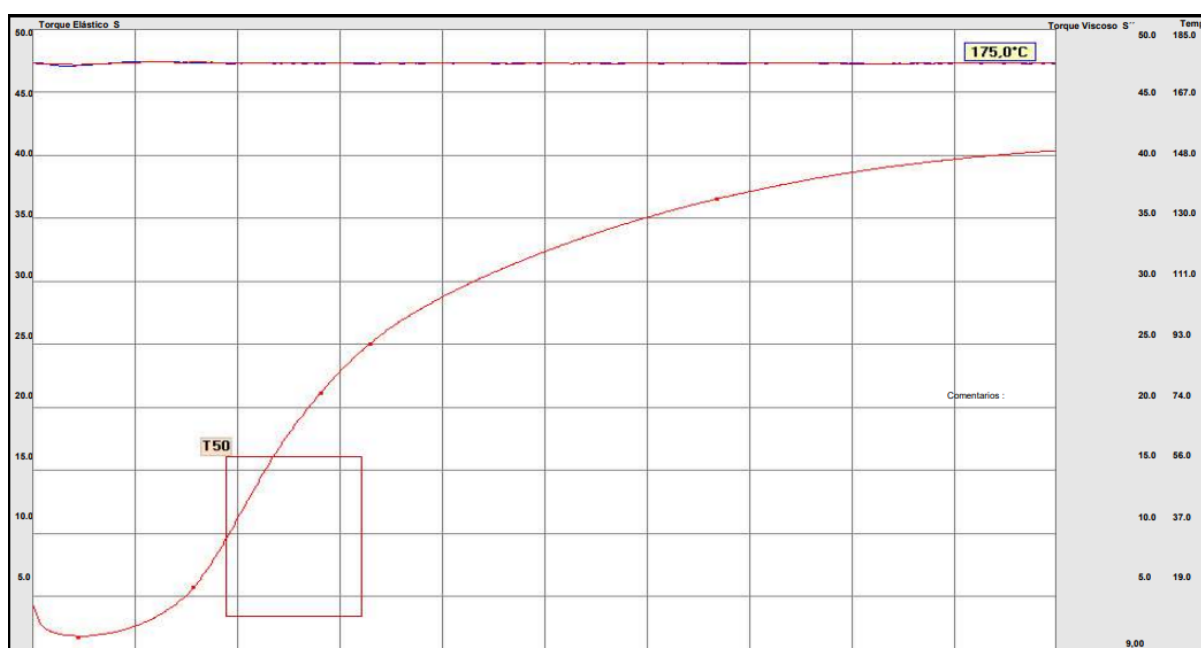


Figura 4. Curva reométrica da primeira versão da Blenda E (10CM:90CR).

Além da reometria, foram realizados ensaios de tração e dureza. Os dados coletados estão resumidos na tabela abaixo:

Tabela 2. Dados de reometria e tração da primeira versão blendas A e E

	Blenda A	Blenda E
Teor Peróxido Dicumila	4 phr	4 phr

ML [Lb.in]	4,08	1,87
MH [Lb.in]	17,25	40,40
ts2 [minutos]	1,45	1,17
t50 [minutos]	2,99	2,52
t60 [minutos]	3,70	2,95
t90 [minutos]	7,00	6,00
Tensão de Ruptura [MPa]	10,42	5,94
Alongamento [%]	551,80	109,20
Dureza [Shore A]	60	69

Houve grande discrepância na vulcanização das blendas. Destaca-se o comportamento ascendente da curva reométrica em ambos materiais, sem um patamar claro de MH, indicando que após vários minutos de vulcanização o grau de cura não ficou estabilizado, mesmo na temperatura adequada de decomposição do peróxido. Os altos valores de t90 também sugerem que o tempo de vulcanização no processo de moldagem seria elevado, aumentando o tempo de ciclo e prejudicando a produtividade.

Além disso, apesar da blenda A ter apresentado propriedades mecânicas razoáveis, com tensão de ruptura acima de 10 MPa, todos os corpos de prova da blenda E romperam com menos de 6 MPa de tensão aplicados, e com cerca de 100% de alongamento. A dureza de ambos materiais ficou acima do valor desejado de 50 ShA, com uma diferença de 10 unidades na blenda A, e 20 unidades na blenda E.

3.1.2.2 Ajuste

Substituiu-se o peróxido de dicumila pelo 1,1-di(terc-butilperoxi)-3,3,5-trimetil ciclohexano, que se decompõe mais rápido e em temperatura mais baixa. O teor final de 7 phr foi definido após cálculo de correspondência do teor de oxigênio ativo entre os teores de peróxido de dicumila encontrados em guias de formulação (Arkema, Tyrin) para o teor do 1,1-di(terc-butilperoxi)-3,3,5-trimetil ciclohexano, e determinado empiricamente para que as formulações atingissem a mesma dureza (considerando uma tolerância de 5 ShA).

3.2 MISTURA

O procedimento de mistura utilizado foi desenvolvido para maximizar a compatibilidade dos polímeros e evitar diferenças no histórico de processamento das amostras, que poderiam interferir nos resultados.

O roteiro completo de mistura está representado na tabela a seguir:

Tabela 3: Ordem de adição e parâmetros de mistura.

Etapa de Mistura	Parâmetro de Controle	Ingrediente
1 (banbury)	60 segundos	CM CR Taiflux-SPE
2 (banbury)	90 segundos	N772
3 (banbury)	3 kWh	
4 (banbury)	4 kWh	TOTM MgO
5 (banbury)	5 kWh	Cera antiozonante TAIC Ca(OH) ₂
6 (banbury)	45 s	
7	Descanso 16 h	
8 (misturador aberto)	5 minutos	
9 (misturador aberto)	5 minutos	Peróxido TETD

3.2.1 Masterbatches

Foram preparados dois masterbatches, com as composições das blendas A e E, até a etapa de descanso do roteiro descrito acima.

Zhang et. al (2015) [1] mostrou que a morfologia da blenda CM/CR era heterogênea, com CM disperso numa matriz homogênea de CR quando a proporção deste era superior a 70%, e que ocorria inversão de fases, uma matriz contínua de CM com CR disperso nas blendas com proporção de CM superior a 50%.

Em seu estudo, *Zhang et. al* realizou a preparação das blendas diretamente e somente com misturador aberto, mas a formulação utilizada possuía menos aditivos (phr total entre 110,5 e 115) e foi produzida em escala de laboratório.

A utilização de masterbatches foi adotada neste estudo esperando evitar heterogeneidade na dispersão e distribuição dos aditivos entre as matrizes poliméricas, que poderia ser prejudicada pelo aumento da escala de produção. No caso, cada masterbatch produzido para este estudo pesava cerca de 41 kg, quantidade necessária para atingir fator de preenchimento acima de 70% no banbury de 43 litros utilizado.

Outro impacto importante do aumento da escala de produção no processo de

mistura foi a condição das matérias primas, em especial o CM. O CM utilizado é fornecido em formato de pó que, apesar da temperatura mais alta do misturador fechado, é menos suscetível ao cisalhamento, de forma que o tempo necessário para amolecimento do polímero e consequente aquecimento viscoso (evidenciado pelo aumento do torque do misturador) foi excessivamente elevado para a produção industrial.

Foi devido a esse desafio que definiu-se para estudo a blenda A com 90% de CM ao invés de 100%. Esta quantidade de CR, cuja matéria prima é fornecida em pequenos blocos, foi suficiente para favorecer o cisalhamento no misturador fechado, facilitando o processo de mistura.

3.2.2 Mistura entre Masterbatches

Uma vez produzidos os masterbatches e após o descanso de 16 horas, foram produzidos 15 kg de amostra da blenda A e da blenda E adicionando os últimos dois ingredientes no misturador aberto, conforme descrito nos passos 8 e 9 do roteiro de mistura.

Em seguida, as blendas A e E foram misturadas entre si nas proporções 3:1, 1:1 e 1:3, para produzir as amostras das blendas B, C e E, respectivamente, totalizando 3kg de cada amostra de blenda.

Finalmente, as amostras das blendas A e E foram repassadas no misturador aberto por 10 minutos para igualar o histórico de processamento de todos os compostos.

3.3 ENSAIOS

Todos os ensaios neste estudo foram realizados conforme as normas ASTM correspondentes.

3.3.1 Reometria

Reometria realizada de acordo com a norma ASTM D5289, à 160°C e à 175°C, em 9 minutos de tempo total de cura.. As curvas completas de cada composto estão localizadas no apêndice 1.



Figura 5. Curômetro TI-100.

3.3.2 Dureza

O ensaio de dureza consiste no uso de um indentador que penetra a amostra com carga padronizada. A medida de dureza é relacionada à profundidade atingida pelo dispositivo. Realizado de acordo com a norma ASTM D2240, com leitura feita após estabilização de 15 segundos, em corpos de prova em formato de batoque.



Figura 6. Durômetro Shore A digital. Fonte: Autor

3.3.3 Tensão e Alongamento na Ruptura

Ensaaios de tensão e alongamento na ruptura, realizados de acordo com a norma ASTM D412. Foi medida a área de todos os corpos de prova e utilizado o valor mediano de cada composto para os ensaios. Ensaio realizado em 6 corpos de prova de cada material.



Figura 7. Extensômetro LRX da LLOYD Instruments. Fonte: Autor

3.3.4 Resistência ao Rasgamento

Ensaaios de rasgamento foram realizados no mesmo extensômetro usado para os ensaios de tensão e alongamento na ruptura. A norma de referência para este ensaio é a ASTM D624. Foi medida a espessura de cada corpo de prova e utilizado o valor mediano para cálculo da resistência ao rasgo. Ensaio realizado em 3 corpos de prova de cada material.

3.3.5 Módulo 300%

Este ensaio também foi realizado no extensômetro dos ensaios anteriores, e segue a mesma norma dos ensaios de tensão e alongamento e na ruptura, ASTM

D412. Ensaio realizado em 3 corpos de prova para cada material

3.3.6 Resistência ao Ozônio

Para avaliar a resistência ao ozônio dos materiais, foi realizado ensaio de longa exposição numa câmara modelo HD-E801 da Haida. Os parâmetros utilizados foram escolhidos com base em normas automotivas. Este ensaio é longo e custoso, foi o último a ser realizado, e devido a uma limitação de apenas 2 corpos de prova, foi escolhido ensaiar apenas as Blendas A e C.

O ensaio consiste na avaliação de corpos de prova em formato de tira sob alongamento constante em exposição à atmosfera e temperatura controladas durante determinado tempo. O material é considerado resistente ao ozônio se não houver trincas no corpo de prova após a exposição.

3.4 TESTE EM PROCESSO

Além dos ensaios de materiais, cada amostra de blenda foi analisada quanto ao custo e quanto ao seu desempenho num processo de conformação por transferência.

O custo foi calculado pela soma dos custos das matérias primas utilizadas, e como as formulações são idênticas quanto à todos outros ingredientes, a variação de custo é devida exclusivamente à proporção dos polímeros.

Foram realizadas quatro ciclos em um molde de 64 cavidades, divididas em 4 seções de 16 peças cada, revezando as amostras em cada seção. A temperatura do molde foi estabilizada em 175°C. O tempo de vulcanização foi de 210 segundos e considerou-se 70 segundos de movimentos de máquina em todos os ciclos.



Figura 8. Mapeamento das seções do molde de transferência.

Neste exemplo, a extração das peças é realizada manualmente pelo operador, e as amostras foram avaliadas pelo tempo de extração e pela ocorrência

de defeitos.

A tabela a seguir mostra qual amostra de blenda foi utilizada em cada seção de cada ciclo.

Tabela x. Mapa de teste de moldagem por transferência.

Ciclo	Seção 1	Seção 2	Seção 3	Seção 4
1	B	C	D	E
2	E	B	C	D
3	D	A	B	C
4	C	D	A	B

Devido à limitação de 4 ciclos no total, não foi possível produzir o mesmo número de peças para todos os materiais. Escolheu-se, então, revezar o material em cada seção de forma que as blendas de proporções intermediárias, B, C e D, fossem testadas em todas as cavidades, enquanto que as amostras A e E foram testadas apenas em duas seções do molde.

Outra razão para o revezamento é reduzir a variabilidade das condições de teste das amostras, dado que pode haver perda de temperatura entre os sucessivos ciclos.

Foi medido o tempo de extração das peças de cada amostra em cada seção, e contabilizado o número de peças defeituosas em relação ao total produzido de cada amostra.

Somando o tempo de extração ao tempo do resto do ciclo da prensa (vulcanização e movimentos de máquina), foi calculado o tempo total de ciclo para cada material e a produtividade (número de ciclos por hora).

4 RESULTADOS

Apresenta-se nesta seção os resultados resumidos. Os dados completos se encontram no apêndice 1.

4.1 REOMETRIA

O resultado comparativo da reometria está ilustrado nas imagens abaixo, e os principais dados resumidos na tabela em seguida. As curvas individuais de cada composto em cada temperatura estão no apêndice 1.

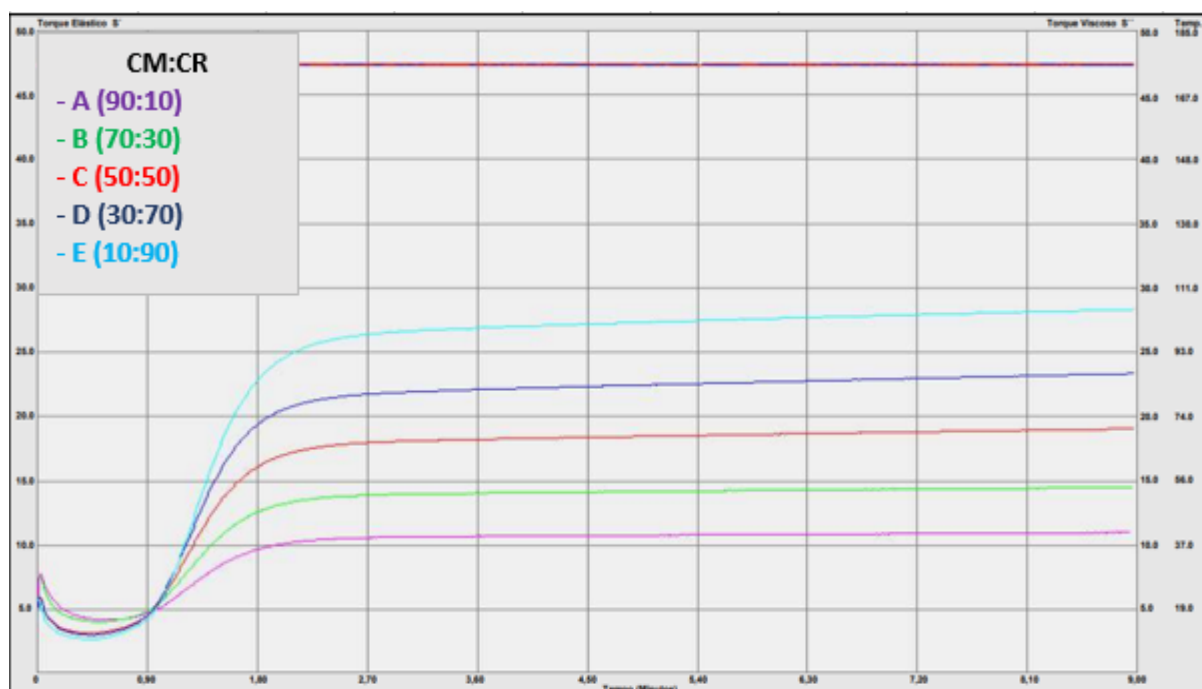


Gráfico 1. Comparativo da reometria das amostras de blendas a 175°C.

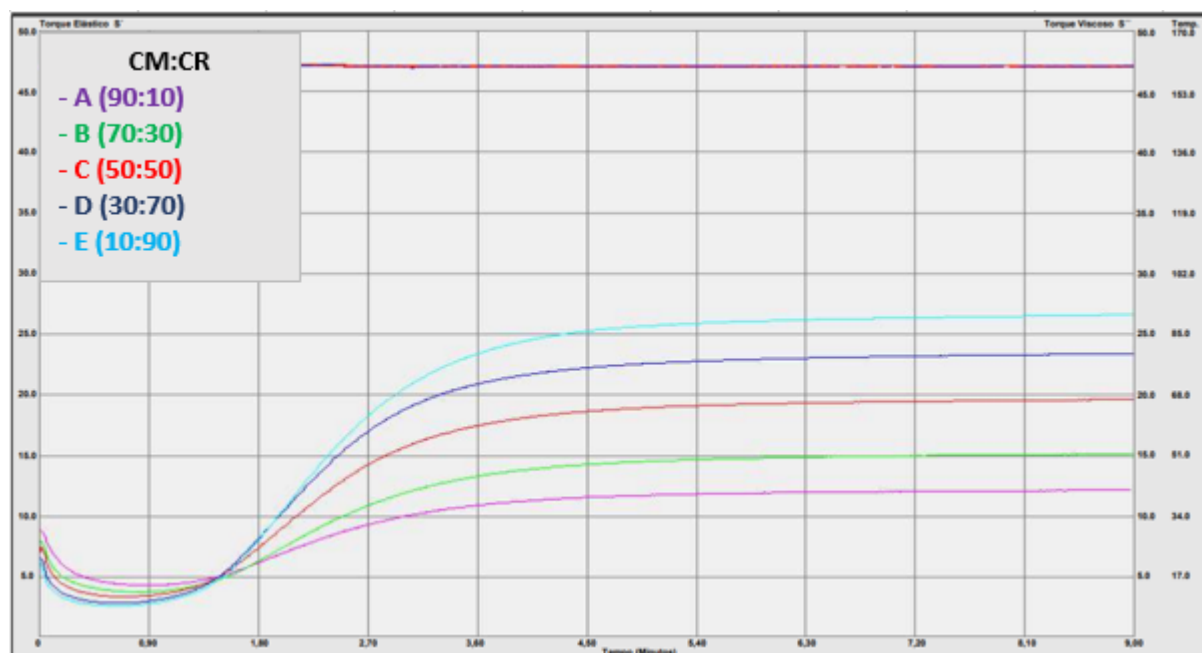


Gráfico 2. Comparativo da reometria das amostras de blendas a 160°C.

Tabela 5. Dados de reometria das amostras de blenda a 160°C e 175°C.

Blenda	A		B		C		D		E	
Temperatura [°C]	160	175	160	175	160	175	160	175	160	175
ML [Lb.in.]	4,32	4,20	3,79	4,07	3,38	3,18	2,86	3,04	2,62	2,71
MH [Lb.in.]	12,18	11,01	15,15	14,49	19,65	19,07	23,42	23,35	26,63	28,33

ts2 [minutos]	1,84	1,19	1,72	1,07	1,54	0,99	1,45	0,95	1,45	0,95
t50 [minutos]	2,35	1,39	2,39	1,37	2,30	1,35	2,25	1,37	2,34	1,42
t60 [minutos]	2,60	1,49	2,64	1,47	2,52	1,45	2,47	2,47	2,57	1,52
t90 [minutos]	4,19	2,19	4,19	2,15	3,92	2,22	3,82	2,32	3,89	2,32

4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Resultados de propriedades mecânicas resumidos na tabela abaixo. Dados apresentados representam a média dos valores encontrados para cada corpo de prova, seguido pelo desvio padrão em parênteses quando houve mais de um resultado.

Tabela 6. Propriedades Mecânicas das amostras de Blendas

Blenda	A	B	C	D	E
Dureza [Shore A]	54	54	52	50	49
Densidade [g/cm ³]	1,272	1,281	1,293	1,302	1,313
Tensão de Ruptura [MPa]	13,89 ($\mp 0,36$)	13,19 ($\mp 0,42$)	11,90 ($\mp 0,32$)	11,87 ($\mp 0,35$)	10,38 ($\mp 0,54$)
Alongamento [%]	815,2 ($\mp 12,2$)	738,6 ($\mp 16,5$)	642,1 ($\mp 8,1$)	589,4 ($\mp 7,4$)	505,0 ($\mp 15,8$)
Resistência ao Rasgo [N/mm]	24,7 ($\mp 0,7$)	23,5 ($\mp 0,4$)	24,1 ($\mp 1,7$)	23,3 ($\mp 1,1$)	23,7 ($\mp 1,7$)
Módulo 300% [MPa]	2,402 ($\mp 0,052$)	2,796 ($\mp 0,074$)	3,197 ($\mp 0,030$)	3,583 ($\mp 0,066$)	4,000 ($\mp 0,045$)

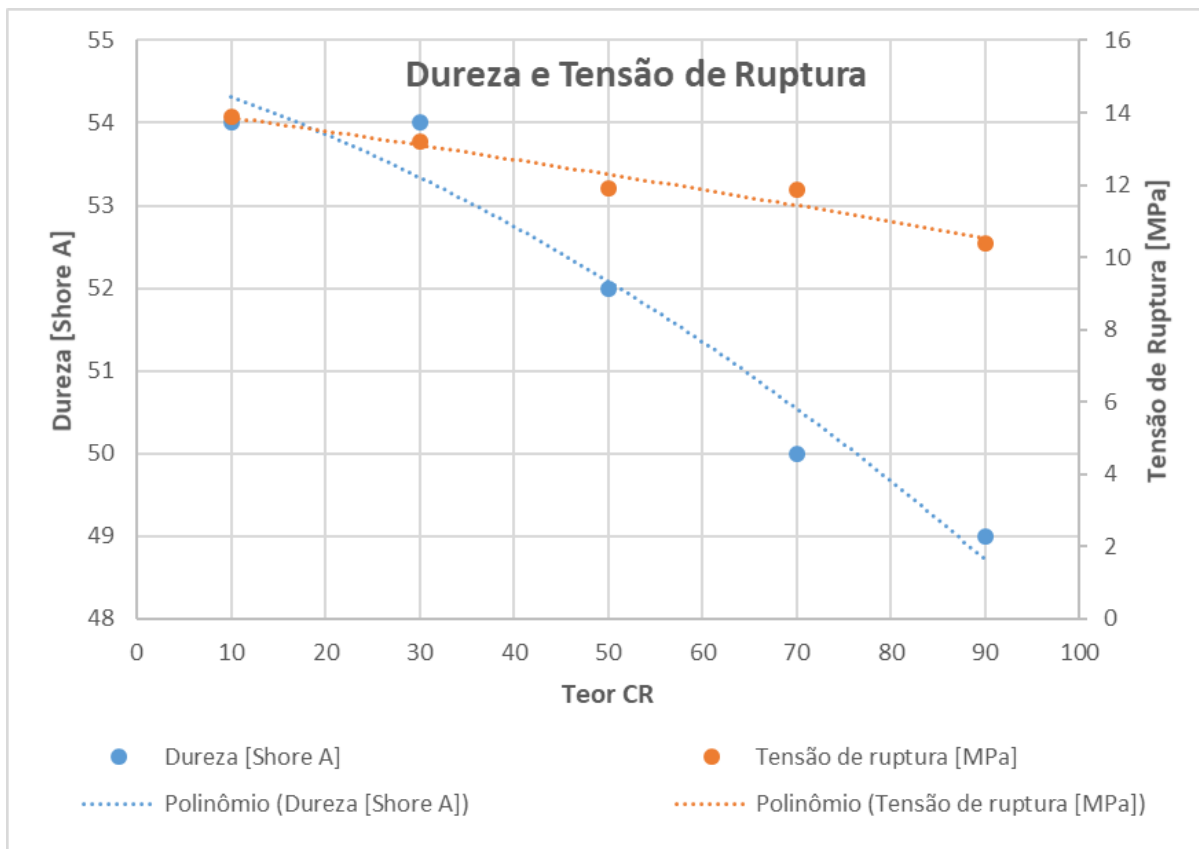


Gráfico 3. Dureza e tensão de ruptura das blendas conforme teor de CR.

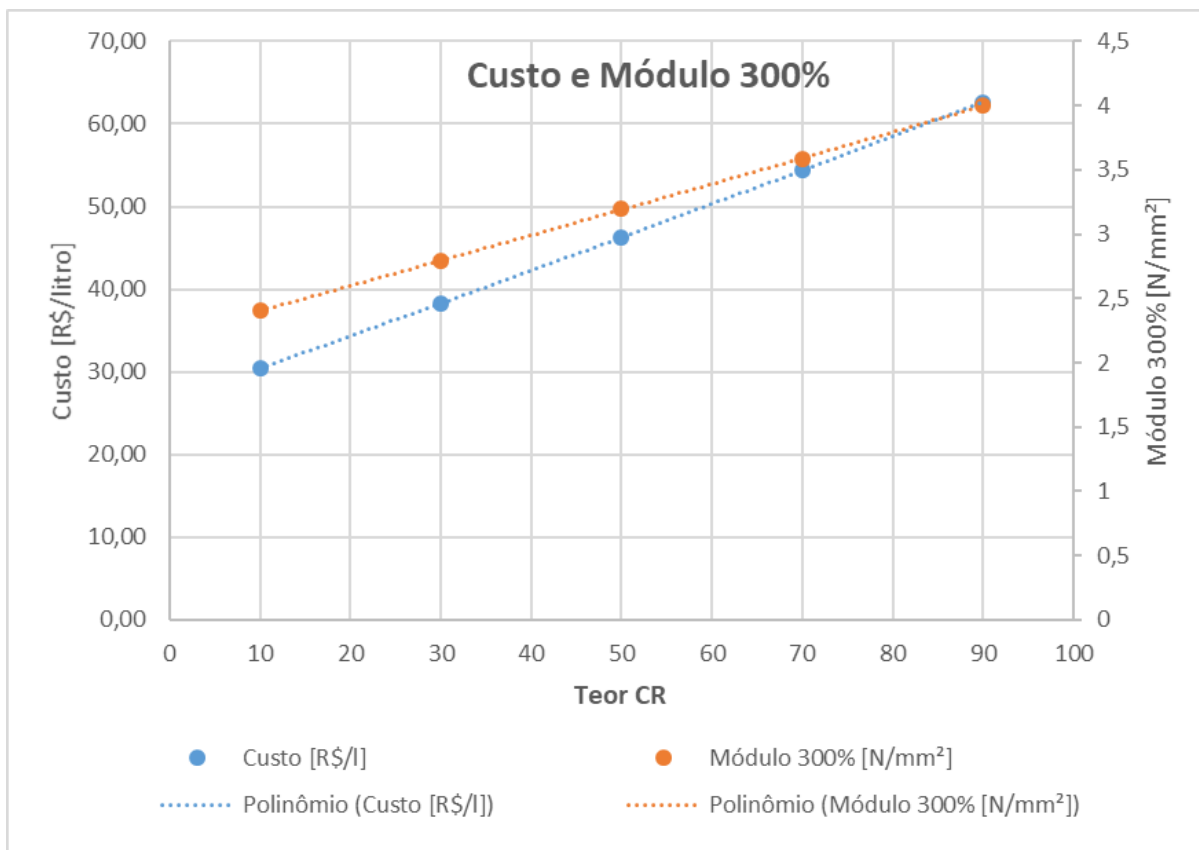


Gráfico 4. Custo e Módulo 300% das amostras de blendas conforme teor de CR.

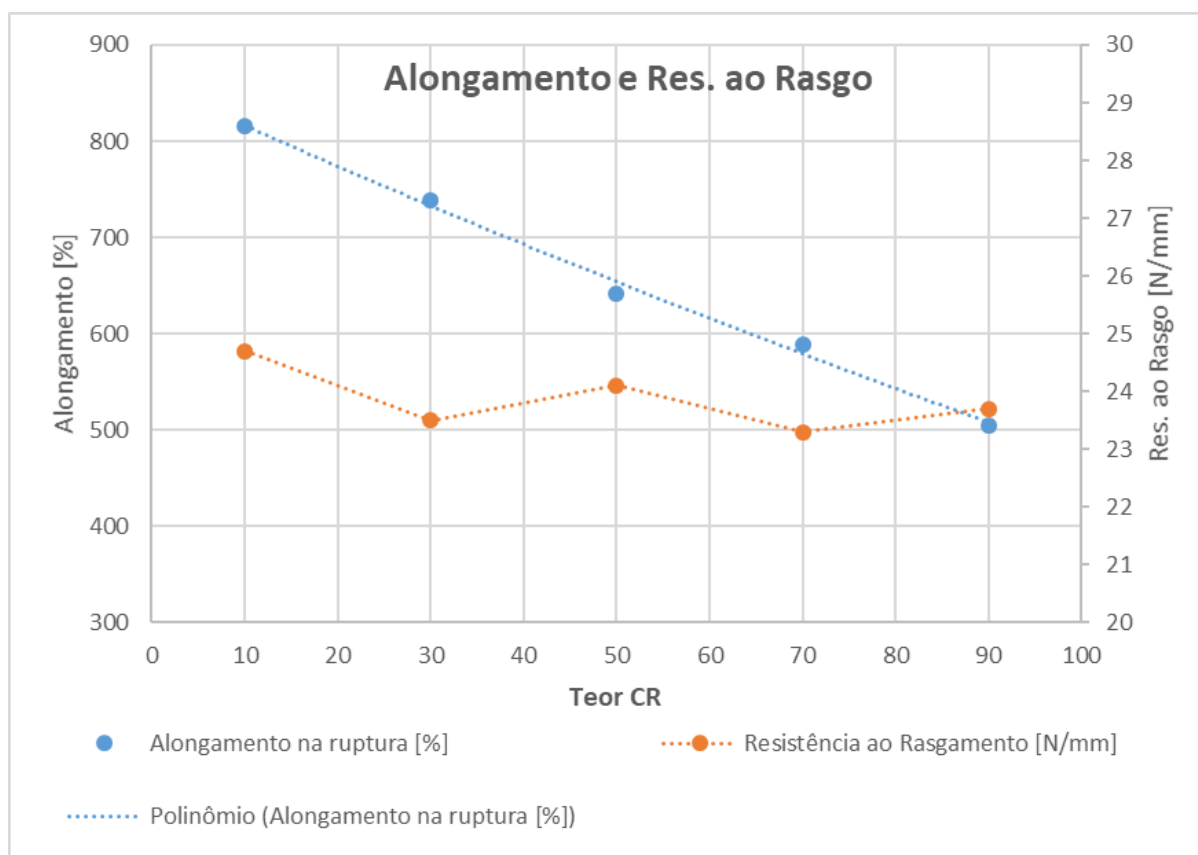


Gráfico 5. Alongamento na ruptura e resistência ao rasgamento de blendas conforme teor de CR.

4.3 RESISTÊNCIA AO OZÔNIO

Os resultados do ensaio de resistência ao ozônio estão apresentados na tabela, e a figura abaixo mostra os parâmetros utilizados durante o ensaio.



Figura 9. Foto do painel da câmara de ozônio durante ensaio com parâmetros controlados.

Tabela 7. Parâmetros e resultados do ensaio de resistência ao ozônio.

Identificação	Tipo de corpo de prova	Concentração de O ₃ [pphm]	Tempo [horas]	Temperatura [°C]	Resultado
90CM:10CR (Blenda A)	Tiras Alongadas a 20%	50 ± 5	200	50 ± 2	Sem Trincas
50CM:50CR (Blenda C)	Tiras Alongadas a 20%	50 ± 5	200	50 ± 2	Sem Trincas

4.3 PROCESSABILIDADE

Os resultados encontrados no teste de produção em molde de transferência estão apresentados na tabela x.

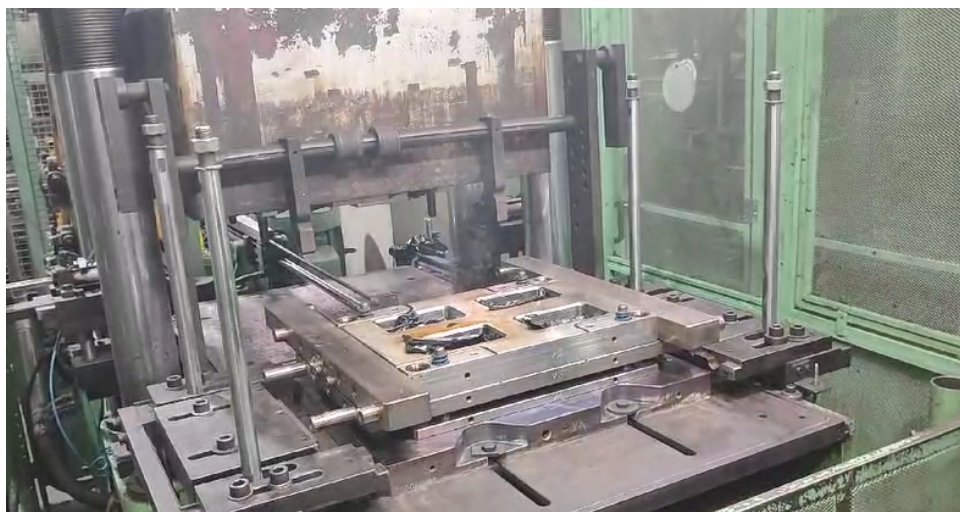


Figura 10. Teste de produção em molde de transferência. Fonte: autor.

Tabela 8. Resultados do teste de produção em molde de transferência.

Blenda	A	B	C	D	E
Peças produzidas	25	59	54	50	21
Peças defeituosas	2	6	5	1	2
Tempo de extração [s]	88	113	105	147	342
Tempo de ciclo [s]	368	393	385	427	622
Produtividade de [ciclos/h]	9,8	9,2	9,4	8,4	5,8

Foram desconsideradas as peças que falharam por preenchimento insuficiente da cavidade por falta de material, pois deseja-se estudar apenas o efeito da proporção dos polímeros das blendas no processo.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 REOMETRIA

O comportamento das curvas de reometria foi semelhante em todas as proporções de blendas de polímeros quanto aos tempos. A amplitude da variação

dos valores de t_{s2} , t_{50} , t_{60} e t_{90} encontrado para as diferentes blendas foi cerca de 20% a 160°C. Já a 175°C, a amplitude da variação foi ainda menor, com cerca de 5% de diferença nos valores. Essa semelhança fica evidenciada no gráfico comparativo.

Atribui-se este resultado ao uso de um único sistema de cura, idêntico em tipo e teor do agente de cura.

Os tempos de vulcanização encontrados estão alinhados com os objetivos industriais do trabalho: mesmo à temperatura mais baixa, de 160°C, o t_{90} foi da ordem de 4 minutos. Com esses valores, é plausível que o processo de conformação atinja produtividade acima de 10 ciclos por hora. E a 175°C, com o valor do t_{90} reduzido para cerca de 2,25 minutos, mostra a possibilidade de atingir ainda mais produtividade.

No entanto, houve diferença expressiva nos valores do torque, tanto mínimo quanto máximo, nas diferentes proporções de blendas: ao passo que o torque mínimo foi menor conforme o teor de CR aumentou, o torque máximo da blenda E foi mais que o dobro da blenda A. Os valores de ML e MH não sofreram grande variação entre as duas temperaturas nas quais os ensaios foram realizados.

5.2 DUREZA

A amplitude da variação de dureza ao longo de todas as proporções de blenda foi de apenas 5 Shore A. Esse resultado está alinhado com o objetivo do trabalho de que todas as blendas sejam adequadas para uma mesma especificação de norma, onde é usual haver tolerância de ± 5 ShA. A maior dureza do CM em relação ao CR supõe-se ser devida a menor compatibilidade do sistema de cura utilizado com o CR, causada por uma tendência de favorecer as reações competitivas à formação de ligações cruzadas durante a cura.

5.3 TENSÃO E ALONGAMENTO DE RUPTURA

Quanto à tensão de ruptura, todas as blendas apresentaram resultados superiores à 10 MPa, que também é uma especificação usual de normas. Mas, observa-se que as blendas com maior teor de CM apresentaram maior resistência, havendo diferença de cerca de 40% no valor encontrado entre as blendas A e E. E o alongamento máximo encontrado antes da ruptura do corpo de prova também foi 300% maior nesse sentido.

O alongamento da ordem de 800% representa uma grande flexibilidade do material, que poderia ser reduzida em detrimento de um aumento da tensão de ruptura, caso fosse desejado.

Conforme o aumento do teor de CR, observou-se diminuição da tensão e do alongamento apesar de que essa mesma variação resultou em aumento expressivo do MH na reometria. Essa constatação indica que a relação entre o MH e as propriedades mecânicas não é diretamente proporcional, e que a maior densidade de ligações cruzadas não necessariamente resulta em melhores propriedades

mecânicas.

5.4 RESISTÊNCIA AO RASGAMENTO

Quanto à resistência dos materiais ao rasgo, observa-se tendência linear de decrescimento conforme o aumento do teor de CR, e a amplitude da variação foi pouco significativa.

5.5 MÓDULO 300%

Contrário à tendência observada nas outras propriedades, as amostras de blendas apresentaram maiores valores de módulo elástico conforme o aumento do teor de CR.

5.6 PROCESSABILIDADE

O teste de conformação em molde de transferência, apesar de curto, permitiu analisar as diferentes proporções de blendas quanto ao seu desempenho em processo, e relacionar esses comportamentos com as propriedades ensaiadas.

Notou-se que conforme o aumento do teor de CM, as peças apresentaram maiores deformações, causadas pelo esforço mecânico de extração. Essa constatação pode ser atribuída ao menor módulo do material: a mesma solicitação nos materiais de maior módulo não causou o mesmo nível de deformação nas peças.

Houve grande diferença no tempo de extração entre as diferentes proporções de blenda CM-CR, que consequentemente impactou o tempo de ciclo e a produtividade do processo. Observou-se que conforme o aumento do teor de CR, a adesão do material no molde se intensificou, de tal forma que as peças tendiam a permanecer na placa inferior do molde ao invés da intermediária. A extração das peças aderidas na placa inferior demanda mais tempo do que na placa intermediária, e assim, o tempo de extração aumentou consideravelmente.

A diferença de produtividade entre as blendas A e E foi da ordem de 40%, valor que foi reduzido à cerca de 15% para as outras amostras.

6 CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo foi possível analisar a variação das propriedades mecânicas da blenda de borrachas cloradas variando exclusivamente a proporção dos polímeros, graças ao uso de um único sistema de reticulação por peróxido orgânico.

A escolha do peróxido mais adequado foi fundamental para adequação às condições de processo industrial, permitindo grande redução dos tempos de vulcanização, e consequentemente de tempo de ciclo, aumentando a produtividade.

As blendas com proporção maior de CM apresentaram melhores propriedades mecânicas, no geral. Fato atribuído aos desafios envolvidos na reticulação peroxídica do CR.

Pela análise das propriedades mecânicas, menor índice de defeitos, e menor custo, as blendas com maior teor de CM se apresentam como as melhores escolhas no exemplo de processo industrial estudado.

Como possibilidades de melhoria a serem estudadas futuramente, sugere-se a substituição do polietileno clorado de cadeia ramificada e baixo peso molecular por outro *grade*, de cadeia linear, maior peso molecular, e maior viscosidade. Essa substituição permitirá analisar se a compatibilidade entre os polímeros é prejudicada pela diferença de viscosidade e se há melhora significativa nas propriedades mecânicas como tensão de ruptura, sem prejudicar o processamento pelo aumento esperado de módulo.

Há também a possibilidade de substituir o *grade* de neoprene por outro com maior cristalinidade e verificar se há prejuízo no processo de mistura ou aumento de propriedades mecânicas, ou por um *grade* especial que seja mais adequado para cura com peróxidos.

A escolha das matérias primas e o roteiro de mistura foram desenvolvidos para favorecer a compatibilidade entre os polímeros, no entanto sugere-se um ensaio de microscopia de força atômica para verificar se houve diferença na morfologia das diferentes blendas em relação ao estudo de *Zhang et. al.*

REFERÊNCIAS

- [1] Zhang, Z.X., Li, Y.-N., Chen, Q., Lu, B., Xin, Z. and Kim, J.K. (2015), **Thermal, morphological, and physicomechanical properties of (chlorinated polyethylene rubber)/(chloroprene rubber) blends**. *J Vinyl Addit Technol*, 21: 18-23. <https://doi.org/10.1002/vnl.21359>
- [2] A.Y. Coran. Chapter 7: Vulcanization. Editor(s): James E. Mark, Burak Erman, C. Michael Roland. **The Science and Technology of Rubber**. Fourth Edition. Academic Press, 2013, Pages 337-381
- [3] HENNING, S. K., COSTIN, R. **Fundamentals of Curing Elastomers with Peroxides and Coagents I: Coagent Structure - Property Relationships**. In: 167th Technical Meeting of the Rubber Division, American Chemical Society, 2005, San Antonio.
- [4] Keith Berry, Max Liu, Khirud Chakraborty, Nikki Pullan, Andrew West, Chris Sammon, Paul D. Topham; **MECHANISM FOR CROSS-LINKING POLYCHLOROPRENE WITH ETHYLENE THIOUREA AND ZINC OXIDE**. *Rubber Chemistry and Technology* 1 March 2015; 88 (1): 80–97. doi: <https://doi.org/10.5254/rct.14.85986>
- [5] Smejda-Krzewicka, A., Olejnik, A. & Strzelec, K. **The effect of metal oxide on the cure, morphology, thermal and mechanical characteristics of chloroprene and butadiene rubber blends**. *Polym. Bull.* 77, 4131–4146 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00289-019-02964-z>

APÊNDICE A - Dados completos dos ensaios

1. Dureza e densidade

DATA	MATERIAL	Dureza [Shore A]	Temp. ambiente [°C]	Umidade rel. ar [%]	Cura	Densidade [g/mm³]
02/08/2024	Blenda A revisão 3	54	21,1	56	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	1,272
02/08/2024	Blenda B revisão 3	54	21,1	56	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	1,281
02/08/2024	Blenda C revisão 3	52	21,1	56	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	1,293
02/08/2024	Blenda D revisão 3	50	21,1	56	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	1,302
02/08/2024	Blenda E revisão 3	49	21,1	56	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	1,313

2. Tensão e alongamento na ruptura

DATA	MATERIAL	LOT#	Área [mm²] (mediana)	Tensão de Ruptura [MPa]	Alongamento [%]	Parâmetros de Cura	Observação
02/08/2024	Blenda A revisão 3	TCC	12,6	13,8	813,1	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	
02/08/2024	Blenda A revisão 3	TCC	12,6	13,7	813,1	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	
02/08/2024	Blenda A revisão 3	TCC	12,6	13,3	793,9	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	
02/08/2024	Blenda A revisão 3	TCC	12,6	14,3	818,7	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	
02/08/2024	Blenda A revisão 3	TCC	12,6	14,1	830	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	
02/08/2024	Blenda A revisão 3	TCC	12,6	14,1	822,1	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	
02/08/2024	Blenda B revisão 3	TCC	12,5	13,1	717,3	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	
02/08/2024	Blenda B revisão 3	TCC	12,5	12,4	724,1	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	
02/08/2024	Blenda B revisão 3	TCC	12,5	13,4	739,9	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	
02/08/2024	Blenda B revisão 3	TCC	12,5	13,5	737,6	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	
02/08/2024	Blenda B revisão 3	TCC	12,5	13,5	762,4	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	
02/08/2024	Blenda B revisão 3	TCC	12,5	13,3	750	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	
02/08/2024	Blenda C revisão 3	TCC	12,5	12	647,5	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	
02/08/2024	Blenda C revisão 3	TCC	12,5	11,9	644,1	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	
02/08/2024	Blenda C revisão 3	TCC	12,5	11,9	637,4	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	
02/08/2024	Blenda C revisão 3	TCC	12,5	12,3	650,9	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	
02/08/2024	Blenda C revisão 3	TCC	12,5	11,4	630,6	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	
02/08/2024	Blenda C revisão 3	TCC	12,5	9,8	581,1	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	Defeito na ruptura (micro bolha)
02/08/2024	Blenda D revisão 3	TCC	12,3	11,6	581,1	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	
02/08/2024	Blenda D revisão 3	TCC	12,3	12,5	601,4	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	
02/08/2024	Blenda D revisão 3	TCC	12,3	11,7	586,7	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	
02/08/2024	Blenda D revisão 3	TCC	12,3	11,8	590,1	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	
02/08/2024	Blenda D revisão 3	TCC	12,3	11,6	583,3	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	
02/08/2024	Blenda D revisão 3	TCC	12,3	12,1	593,5	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	
02/08/2024	Blenda E revisão 3	TCC	12,3	10,4	498,9	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	
02/08/2024	Blenda E revisão 3	TCC	12,3	10,4	504,5	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	
02/08/2024	Blenda E revisão 3	TCC	12,3	10,5	507,2	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	
02/08/2024	Blenda E revisão 3	TCC	12,3	10,5	510,1	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	
02/08/2024	Blenda E revisão 3	TCC	12,3	9,1	467,3	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	
02/08/2024	Blenda E revisão 3	TCC	12,3	10,1	504,5	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	

3. Resistência ao rasgo

DATA	MATERIAL	LOT#	Espessura [mm] (mediana)	Carga [N]	Alongamento [%]	Parâmetros de Cura	Res. Ao Rasgo [N/mm]
02/08/2024	Blenda A revisão 3	TCC	1,92	48,2	227,5	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	25,1
02/08/2024	Blenda A revisão 3	TCC	1,92	48,1	224,1	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	25,1
02/08/2024	Blenda A revisão 3	TCC	1,92	45,9	216,2	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	23,9
02/08/2024	Blenda B revisão 3	TCC	1,93	46,2	167,8	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	23,9
02/08/2024	Blenda B revisão 3	TCC	1,93	45,5	174,5	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	23,6
02/08/2024	Blenda B revisão 3	TCC	1,93	44,6	163,3	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	23,1
02/08/2024	Blenda C revisão 3	TCC	1,93	46,6	168,9	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	24,1
02/08/2024	Blenda C revisão 3	TCC	1,93	43	147,5	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	22,3
02/08/2024	Blenda C revisão 3	TCC	1,93	49,7	181,3	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	25,8
02/08/2024	Blenda D revisão 3	TCC	1,9	46	165,5	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	24,2
02/08/2024	Blenda D revisão 3	TCC	1,9	44,9	156,5	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	23,6
02/08/2024	Blenda D revisão 3	TCC	1,9	42,1	138,5	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	22,2
02/08/2024	Blenda E revisão 3	TCC	1,9	48,2	162,2	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	25,4
02/08/2024	Blenda E revisão 3	TCC	1,9	41,9	135,1	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	22,1
02/08/2024	Blenda E revisão 3	TCC	1,9	44,8	150,9	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	23,6

4. Módulo 300%

DATA	MATERIAL	LOT	Área [mm²] (mediana)	Carga [N]	Alongamento [%]	Parâmetros de Cura	Módulo [N/mm²]
02/08/2024	Blenda A revisão 3	TCC	12,7	30,6	300	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	2,409
02/08/2024	Blenda A revisão 3	TCC	12,7	29,8	300	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	2,346
02/08/2024	Blenda A revisão 3	TCC	12,7	31,1	300	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	2,449
02/08/2024	Blenda B revisão 3	TCC	12,6	34,8	300	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	2,762
02/08/2024	Blenda B revisão 3	TCC	12,6	36,3	300	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	2,881
02/08/2024	Blenda B revisão 3	TCC	12,6	34,6	300	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	2,746
02/08/2024	Blenda C revisão 3	TCC	12,5	40,4	300	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	3,232
02/08/2024	Blenda C revisão 3	TCC	12,5	39,8	300	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	3,184
02/08/2024	Blenda C revisão 3	TCC	12,5	39,7	300	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	3,176
02/08/2024	Blenda D revisão 3	TCC	12,3	43,2	300	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	3,512
02/08/2024	Blenda D revisão 3	TCC	12,3	44,8	300	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	3,642
02/08/2024	Blenda D revisão 3	TCC	12,3	44,2	300	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	3,593
02/08/2024	Blenda E revisão 3	TCC	12,3	49,8	300	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	4,049
02/08/2024	Blenda E revisão 3	TCC	12,3	48,7	300	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	3,959
02/08/2024	Blenda E revisão 3	TCC	12,3	49,1	300	Vulc. 9 minutos à 160°C + Pós Cura 4h à 100°C	3,992