

**CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC  
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**FERNANDA ALMEIDA DE ALMEIDA  
LEONARDO BRUNO SILVA  
LUÃ FONSECA SEIXAS  
LUITA SILVEIRA DOS SANTOS  
VICTOR LAURENT SAMPAIO FERREIRA**

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E PLANEJAMENTO  
ESTATÍSTICO EXPERIMENTAL EM BLENDAS PVC/NBR PARA APLICAÇÃO EM  
JUNTAS DE VEDAÇÃO PARA LIGAÇÕES FLANGEADAS.**

**SALVADOR – BA  
2020**

FERNANDA ALMEIDA DE ALMEIDA  
LEONARDO BRUNO SILVA  
LUÃ FONSECA SEIXAS  
LUITA SILVEIRA DOS SANTOS  
VICTOR LAURENT SAMPAIO FERREIRA

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E PLANEJAMENTO  
ESTATÍSTICO EXPERIMENTAL EM BLENDAS PVC/NBR PARA APLICAÇÃO EM  
JUNTAS DE VEDAÇÃO PARA LIGAÇÕES FLANGEADAS.**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado ao Centro Universitário SENAI  
CIMATEC como parte das exigências para a  
obtenção do título de bacharel em Engenharia  
de Materiais.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Pollyana da Silva Melo  
Cardoso  
Coorientador: Prof. Dr. Danilo Hansen  
Guimarães

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

FERNANDA ALMEIDA DE ALMEIDA  
LEONARDO BRUNO SILVA  
LUÃ FONSECA SEIXAS  
LUITA SILVEIRA DOS SANTOS  
VICTOR LAURENT SAMPAIO FERREIRA

### **AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E PLANEJAMENTO ESTATÍSTICO EXPERIMENTAL EM BLENDAS PVC/NBR PARA APLICAÇÃO EM JUNTAS DE VEDAÇÃO PARA LIGAÇÕES FLANGEADAS.**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Centro Universitário SENAI CIMATEC como parte das exigências para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Salvador, de de .

### **BANCA EXAMINADORA**

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Pollyana da Silva Melo Cardoso – Orientadora  
Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de  
Sergipe (UFS)  
Centro Universitário SENAI CIMATEC

---

Prof. Dr. Danilo Hansen Guimarães – Coorientador e Coordenador do Curso de  
Engenharia de Materiais  
Doutorado em Engenharia Química, Universidade Federal da Bahia (UFBA)  
Centro Universitário SENAI CIMATEC

---

Dr. Ivo Andrei de Oliveira Lino Lima  
Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial, SENAI  
CIMATEC  
BRASKEM

---

Prof. João Lucas da Hora de Jesus – Docente Theoprax / GTA  
MBA Executivo em Gestão de Projetos, SENAI CIMATEC  
Centro Universitário SENAI CIMATEC

---

Me. Lucas Nao Horiuchi  
Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal de São  
Carlos (UFSCAR)  
Centro Universitário SENAI CIMATEC

---

Dr. Luciano Pisanu  
Doutorado em Engenharia Industrial, Universidade Federal da Bahia (UFBA)  
Centro Universitário SENAI CIMATEC

## **AGRADECIMENTOS**

Toda a equipe do projeto gostaria de agradecer profundamente aos nossos familiares e colegas por todo o apoio e motivação dedicados no decorrer deste trabalho.

Agradecemos a todos da Braskem pelo investimento e por permitir o desenvolvimento deste projeto a equipe, em especial ao Ivo Andrei e ao Emerson Madaleno por confiar a continuidade do projeto e pelos auxílios durante a execução do mesmo.

Aos parceiros da Nitriflex, pela disponibilização de material necessário a realização da pesquisa, em especial para a Márcia Valéria pelo auxílio da disponibilização da NBR.

Aos parceiros da Teadit por todo o suporte e esforços dedicados a realização dos ensaios das juntas, pelos conselhos e pela cooperação, em especial ao José Carlos Veiga e ao Carlos Girão.

Ao Centro Universitário SENAI CIMATEC e toda sua equipe de profissionais pelo apoio dado nos laboratórios de caracterização de materiais e de polímeros.

A nossas colegas Amanda Dantas, Isa Moreira, Taynã Isis de Santana, Thaís dos Santos e Verlane Jesus pelo desenvolvimento do projeto que precedeu nosso trabalho e pelo suporte dado na disponibilização de informações e cooperação a continuidade dessa pesquisa.

Aos nossos colegas João Marçal e Michele Martins, por desenvolver em conjunto o projeto de suporte paralelo a este trabalho, cooperando e disponibilizando tempo e informações complementares a nossa pesquisa.

A todos os profissionais que ajudaram em alguma parte da nossa formação profissional ao decorrer do nosso curso. Em especial, aos professores Pollyana Melo e Danilo Hansen pela confiança no nosso trabalho como engenheiros de materiais em formação e por nos orientarem durante a execução do projeto.

*“A ciência é a experiência, e a experiência é um manto que se tece ao longo de vários séculos. E quanto mais o manto se estende, mais a ciência é completa e segura.”*

-Carlo Bini

## RESUMO

Materiais como juntas de vedação precisam apresentar boas características de selabilidade para promover uma correta vedação na união de flanges em tubulações industriais, garantindo bom tempo de vida, boa faixa de temperatura de aplicação e principalmente segurança. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar as características mecânicas de blendas PVC/NBR para aplicação como juntas de vedação. Com esta finalidade foram propostas e desenvolvidas quatro formulações, variando os teores de Carga mineral ( $\text{CaCO}_3$ ) como 10 e 40 pcr, e de NBR, como 10 e 30 pcr nas composições dos materiais. Os resultados obtidos revelaram que tanto a presença da carga quanto da borracha nitrílica promoveram mudanças na Densidade das composições, bem como isto influenciou o desempenho destas nos ensaios de Compressão e Recuperação, sendo que as formulações com maior teor de NBR tiveram maior compressibilidade. A ser avaliada a Resistência à Tração das formulações, foi verificado que tanto o aumento do teor de carga como o de NBR promoveu redução desta propriedade. Observou-se também, pelo ensaio de Relaxamento Creep, que as formulações não conseguiram desempenhar uma boa resistência ao aperto ao longo tempo a uma temperatura de 70°C. Verificou-se, por fim, pelo ensaio de Selabilidade que ocorreu muita variação dos resultados de vazamento, muito além do aceitável para juntas, revelando em paralelo as outras análises a inviabilidade destas blendas para a aplicação estudada.

**Palavras-chave:** Blendas, Juntas industriais, PVC, NBR, Carbonato de cálcio, Caracterização mecânica.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Monômeros contendo duas ligações duplas sequenciais.	14
Figura 2. Formas de cadeia polimérica: a) linear; b) ramificada; c) com ramificações em estrela; d) escalar; e) grafítico ou enxertado; f) semi-escalar; g) com ligações cruzadas ou reticulado.	15
Figura 3. Monômero do Cloreto de vinila (a esquerda) e os “meros” do Policloreto de vinila (a direita).	17
Figura 4. Representação esquemática do processo de polimerização em suspensão do PVC.	19
Figura 5. Representação esquemática das espécies presentes na morfologia de partícula do PVC obtido pelo processo de polimerização em suspensão.	20
Figura 6. Estrutura molecular dos meros de repetição da Borracha de Butadieno Acrilonitrila.	24
Figura 7. Esquema para as formas de distribuição espacial das partículas de borracha: a) bem dispersa; b) aglomerada; c) pseudo-network.	26
Figura 8. Esquema das formas de dispersão da fase borrachosa em blendas de PVC e partículas de borracha: a) “pseudo-network”, b) “network”, c) partículas bem dispersas.	27
Figura 9. Esquema de uma ligação flangeada	32
Figura 10. Representações dos três tipos de Flange: a) Face ressaltada (Raised Face ou RF), b) Face Plana (Flat Face ou FF) e c) Face para Junta de Anel (Ring Type Joint ou RTJ)	33
Figura 11. Exemplo de uma junta não-metálica, de Fibra de aramida e NBR.	34
Figura 12. Exemplo de uma junta semi metálica.	36
Figura 13. Exemplos de juntas metálicas	37
Figura 14. Exemplos de tipos juntas metálicas, onde a) Flange de face ressaltada; b) Flange de face plana; c) Junta semi metálica em espiral; d) Junta metálica folheada; e) Junta metálica maciça; d) e g) Juntas metálicas de anel.	38
Figura 15. Esquema demonstrando as principais forças atuantes na união flangeada.	40
Figura 16. Gráfico pressão x temperatura para juntas de Papelão hidráulico de Fibra Aramida e NBR.	43
Figura 17. Fluxograma do desenvolvimento das formulações.	55
Figura 18. Placas de 1,6mm após estampagem, onde: a) e b) PVC40C30NBR, c) e d) PVC10C30NBR.	61

Figura 19. Placas de 1,6mm após estampagem, onde; a) e b):PVC40C10NBR , c) e d):PVC10C10NBR.	61
Figura 20. Placas de 3,2mm após estampagem, onde; a):PVC40C30NBR , b):PVC10C30NBR , c):PVC40C10NBR e d):PVC10C10NBR.	62
Figura 21. Gráfico dos resultados para Densidade das formulações propostas.	63
Figura 22. Gráfico de interações e efeitos para Densidade, por fatorial 2 <sup>2</sup> .	65
Figura 23. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para Densidade, por fatorial 2 <sup>2</sup> .	65
Figura 24. Gráfico de Contorno para Densidade, por fatorial 2 <sup>2</sup> .	66
Figura 25. Gráfico dos resultados para Compressibilidade com referência da NA 1002.	67
Figura 26. Gráfico dos resultados para Taxa de Recuperação com referência da NA 1002.	68
Figura 27. Gráfico de interações e efeitos para Compressão, pelo fatorial 2 <sup>2</sup> (1,6mm).	71
Figura 28. Gráfico de interações e efeitos para Recuperação, pelo fatorial 2 <sup>2</sup> (1,6mm).	71
Figura 29. Gráfico de interações e efeitos para Compressão, pelo fatorial 2 <sup>3</sup> .	72
Figura 30. Gráfico de interações e efeitos para Recuperação, pelo fatorial 2 <sup>3</sup> .	72
Figura 31. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para Compressão, pelo fatorial 2 <sup>2</sup> (1,6mm).	73
Figura 32. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para Compressão, pelo fatorial 2 <sup>3</sup> .	74
Figura 33. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para Recuperação, pelo fatorial 2 <sup>3</sup> .	74
Figura 34. Gráfico de Contorno para Compressão, com Espessura fixada em 1,6mm, pelo fatorial 2 <sup>3</sup> .	75
Figura 35. Gráfico de Contorno para Compressão, com Espessura fixada em 3,2mm, pelo fatorial 2 <sup>3</sup> .	75
Figura 36. Gráfico de Contorno para Recuperação, com Espessura fixada em 1,6mm, pelo fatorial 2 <sup>3</sup> .	76
Figura 37. Gráfico de Contorno para Recuperação, com Espessura fixada em 3,2mm, pelo fatorial 2 <sup>3</sup> .	76
Figura 38. Gráfico dos resultados para Resistência a tração na direção transversal à laminação, de amplas espessuras, com referência da NA 1002.	77
Figura 39. Gráfico dos resultados para Resistência a tração na direção paralela a laminação, das placas com 1,6mm de espessura, com referência da NA 1002.	78
Figura 40. Gráfico de interações e efeitos para Resistência a Tração, pelo fatorial	80

2<sup>2</sup>(1,6mm).

Figura 41. Gráfico de interações e efeitos para Resistência a Tração, pelo fatorial 2 <sup>3</sup> .	80
Figura 42. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para Resistência a Tração, pelo fatorial 2 <sup>3</sup> .	81
Figura 43. Gráfico de Contorno para Resistência a Tração, com Espessura fixada em 1,6mm, pelo fatorial 2 <sup>3</sup> .	81
Figura 44. Gráfico de Contorno para Resistência a Tração, com Espessura fixada em 3,2mm, pelo fatorial 2 <sup>3</sup> .	82
Figura 45. Gráfico dos resultados para Relaxamento Creep - Fator PQR, com referência da NA 1002.	84
Figura 46. Gráfico de interações e efeitos para Relaxamento Creep, pelo fatorial 2 <sup>2</sup> (1,6mm).	85
Figura 47. Gráfico de interações e efeitos para Relaxamento Creep, pelo fatorial 2 <sup>3</sup> .	86
Figura 48. Gráfico dos resultados para Taxa de Vazamento, com referência da NA 1002.	87
Figura 49. Gráfico de interações e efeitos para Selabilidade(vazamento), pelo fatorial 2 <sup>2</sup> (1,6mm).	88
Figura 50. Gráfico de interações e efeitos para Selabilidade(vazamento), pelo fatorial 2 <sup>3</sup> .	89
Figura 51. Propriedades dos principais polímeros utilizados como elementos de vedação.	95
Figura 52. Aplicações típicas para o PTFE e seus enchimentos como Material de Vedação.	100

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características do NORVIC® SP767RA.	50
Tabela 2: Características do Nitriflex NP-3183 NV.	51
Tabela 3: Formulações propostas.	52
Tabela 4: Planejamentos experimentais propostos.	54
Tabela 5: Parâmetros de processamento para o composto.	55
Tabela 6: Comparação entre as Densidades das Blendas PVC/NBR com as composições de PVC para juntas estudadas por Dantas et al. (2019).	64
Tabela 7: ANOVA com significância para a Densidade, pelo fatorial 2 <sup>2</sup> .	64
Tabela 8: Comparação entre a Compressão das Blendas PVC/NBR com as composições de PVC para juntas estudadas por Dantas et al. (2019).	68
Tabela 9: Comparação entre a Recuperação das Blendas PVC/NBR com as composições de PVC para juntas estudadas por Dantas et al. (2019).	69
Tabela 10: ANOVA com significância para a Compressão, pelo fatorial 2 <sup>2</sup> (1,6mm).	70
Tabela 11: ANOVA com significância para a Compressão, pelo fatorial 2 <sup>3</sup> .	70
Tabela 12: ANOVA com significância para a Recuperação, pelo fatorial 2 <sup>3</sup> .	70
Tabela 13: Comparação entre a Resistência à Tração no sentido Transversal das Blendas PVC/NBR com as composições de PVC para juntas estudadas por Dantas et al. (2019).	78
Tabela 14: ANOVA com significância para a Resistência à Tração, pelo fatorial 2 <sup>3</sup> .	79
Tabela 15: Comparação entre o Relaxamento Creep(PQR) das Blendas PVC/NBR com as composições de PVC para juntas estudadas por Dantas et al. (2019).	84
Tabela 16: Comparação entre o Selabilidade(Vazamento) das Blendas PVC/NBR com as composições de PVC para juntas estudadas por Dantas et al. (2019).	87
Tabela 17: Comparação entre as propriedades de aplicação para juntas (no geral) das blendas PVC/NBR estudadas neste trabalho, as composições de PVC Dantas et al. (2019) e o material de junta para referência da Teadit, NA 1002.	92

## LISTA DE SIGLAS

”	Polegadas
µm	Micrômetro
<b>ANOVA</b>	Análise de variância
<b>ASTM</b>	Sociedade Americana de Testes e Materiais
<b>BR</b>	Borracha de polibutadieno
<b>BS</b>	Normatizações Britânicas
<b>Ca</b>	Cálcio
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	Carbonato de cálcio
<b>cm</b>	Centímetro
<b>CR</b>	Borracha de cloropreno
<b>DCE</b>	Dicloroetano
<b>DOE</b>	Planejamento experimental (Design of experiments)
<b>EPDM</b>	Etileno-propileno-dieno
<b>EPT</b>	Terpolímero etileno-propileno-dieno
<b>ETFE</b>	Poli(etileno-co-tetrafluoretileno)
<b>FEP</b>	Propileno-etileno fluorado
<b>FF</b>	Face plana
<b>g</b>	Gramas
<b>h</b>	Horas
<b>HCl</b>	Cloreto de hidrogênio ou Ácido clorídrico
<b>HDOxPEs</b>	Homopolímero de polietileno oxidado
<b>HDPE-g-MAH</b>	Polietileno de alta densidade grafitado com anidrido maleico
<b>ISO</b>	Organização Internacional de Padronização
<b>IUPAC</b>	União internacional da Química Pura e Aplicada
<b>JTA</b>	Junta metálica de anel

<b>kgf</b>	Kilograma força
<b>mL</b>	Mililitros
<b>mm</b>	Milímetros
<b>MoS2</b>	Dissulfeto de Molibdênio
<b>MPa</b>	Mega Pascal
<b>MVC</b>	Monocloreto de vinila
<b>NA 1002</b>	Material de junta da Teadit
<b>NBR</b>	Borracha Nitrílica
<b>NR</b>	Borracha natural
<b>O2</b>	Gás oxigênio
<b>°C</b>	Graus centígrados
<b>PA</b>	Poliamida
<b>PAI</b>	Poliamida-imida
<b>PC</b>	Policarbonato
<b>pcr</b>	Partes por cem
<b>PEEK</b>	Poliéteréter-cetona
<b>PEUAPM</b>	Poliétileno de ultra alto peso molecular
<b>PFA</b>	Resina de polímero perfluoroalcoxi
<b>PI</b>	Poliimida
<b>POM</b>	Poliacetal ou Polióxido de Metileno
<b>PPS</b>	Sulfeto de Polifenileno
<b>pPVC</b>	Policloreto de vinila flexível
<b>PQR</b>	Fator adimensional de relaxamento
<b>PTFE</b>	Politetrafluoretileno
<b>PVC</b>	Policloreto de vinila
<b>PVC40C30NBR</b>	Formulação 1
<b>PVC10C30NBR</b>	Formulação 2
<b>PVC40C10NBR</b>	Formulação 3

<b>PVC10C10NBR</b>	Formulação 4
<b>RF</b>	Face ressaltada
<b>rpm</b>	Rotações por minuto
<b>RTJ</b>	Face para junta de anel
<b>SBR</b>	Borracha de estireno
<b>ShoreD</b>	Dureza Shore
<b>T</b>	Toneladas
<b>Tg</b>	Temperatura de transição vítrea
<b>Tm</b>	Temperatura de amolecimento(fusão)
<b>UHMWPE</b>	Polietileno de ultra alto peso molecular (sigla em inglês)
<b>uPVC</b>	Policloreto de vinila rígido
<b>UTEC</b>	Polietileno de ultra alto peso molecular da Braskem
<b>UV</b>	Ultravioleta

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>09</b>
1.1 Justificativa	11
1.2 Objetivos	12
1.2.1 Objetivo geral	12
1.2.2 Objetivos específicos	12
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>12</b>
2.1 Polímeros	12
2.2 Policloreto de Vinila (PVC)	15
2.3 Borracha Nitrílica (NBR)	23
2.4 Blendas PVC/NBR	25
2.5 Aditivação do PVC	27
2.5.1 Estabilizantes térmicos	27
2.5.2 Plastificantes	28
2.5.3 Lubrificantes	29
2.5.4 Antioxidantes	30
2.5.5 Cargas Minerais	30
2.5.6 Pigmentos	31
2.6 Juntas Industriais	32
2.6.1 Ligações Flangeadas	32
2.6.2 Juntas para Flanges	33
2.6.2.1 Juntas Não-metálicas	34
2.6.2.2 Juntas Semi Metálicas	36
2.6.2.3 Juntas Metálicas	37
2.6.3 Forças na União Flangeada	38
2.6.4 Critérios de um Projeto de Juntas	41
2.6.4.1 Vazamento	41
2.6.4.2 Condições de Pressão e Temperatura	42
2.6.4.3 Adequações aos Flanges	43
2.6.4.4 Compatibilidade Química	45
2.6.4.5 Propriedades Mecânicas	46
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>49</b>
3.1 Materiais	50
3.1.1 Planejamento Experimental (DOE)	52

<b>3.2 Desenvolvimento das formulações</b>	<b>54</b>
<b>3.3 Caracterizações Mecânicas</b>	<b>56</b>
3.3.1 Densidade	56
3.3.2 Compressão e Recuperação	57
3.3.3 Resistência à Tração	58
3.3.4 Relaxamento Creep (PQR)	59
3.3.5 Selabilidade com Nitrogênio	59
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>61</b>
4.1 Densidade	62
4.2 Compressão e Recuperação	66
4.3 Resistência à Tração	76
4.4 Relaxamento Creep (PQR)	82
4.5 Selabilidade com Nitrogênio	86
<b>5 CONCLUSÕES</b>	<b>90</b>
<b>6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>93</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>105</b>
<b>ANEXO I</b>	<b>109</b>
<b>ANEXO II</b>	<b>111</b>
<b>ANEXO III</b>	<b>112</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As juntas de vedação industriais são usadas para criar uma vedação estática entre dois membros estacionários de um conjunto mecânico e para manter essa vedação sob condições operacionais que podem variar dependendo de alterações nas pressões e temperaturas. Se fosse possível ter flanges perfeitamente acoplados e se fosse possível manter um contato íntimo desses flanges perfeitamente combinados durante os extremos das condições de operação, uma junta não seria necessária. Isso é praticamente uma impossibilidade por causa do tamanho das flanges, a dificuldade em manter esses acabamentos de flange extremamente suaves durante o manuseio e montagem e a corrosão e erosão das superfícies do flange durante as operações. Uma vedação é afetada pela compressão do material da junta e fazendo com que ela flua para as imperfeições nas superfícies de assentamento da junta, de modo que seja feito um contato íntimo entre a junta e as superfícies de assentamento da junta, impedindo a fuga dos fluidos confinados (LEMONS 2016).

Quando pretende-se selecionar um material para uma junta de vedação industrial precisa-se considerar a compressibilidade diante das forças resultantes do esmagamento da junta entre os flanges e a força de vedação, pela resistência a pressão interna do fluido vedado, bem como as temperaturas que esta junta será sujeita em operação e a resistência química, considerando os diversos fluidos agressivos que podem passar em uma tubulação industrial (VEIGA 2014). As propriedades mecânicas, térmicas e químicas do material devem ser compatíveis a esses ambientes.

Segundo o Instituto Brasileiro do PVC (2020), em diversas áreas da indústria, o PVC é largamente utilizado e sua presença tem se mostrado fundamental para o desenvolvimento de inovações e disseminação de soluções. Os materiais plásticos são amplamente utilizados para vedações, diretamente como componente de vedação ou como parte do conjunto geral, dentre os benefícios de sua utilização

pode-se citar no geral a baixa fricção, boa resistência a abrasão, ampla gama de polímeros com boa resistência química, boa resistência a tração, boas faixas de temperaturas de trabalho, dentre outros (FLITNEY 2007). O PVC é amplamente utilizado devido principalmente a sua versatilidade e a possibilidade de se adaptar a diferentes processamentos e adição de diversos tipos de aditivos, podendo variar bastante suas propriedades e aplicações. Esta versatilidade também é verificada pelos diversos processos de transformação que o PVC aditivado pode sofrer, tais como a injeção, calandragem, extrusão e termoformagem (MADALENO et al. 2009).

Quanto aos elastômeros, estes são amplamente utilizados e as possíveis aplicações cobrem toda a gama de vedações estáticas e dinâmicas e este grupo de materiais inclui borracha natural e os vários tipos sintéticos de elastômeros, como neoprene, borrachas nitrílicas, butil, etileno, propileno dieno, estireno butadieno e Viton (SMITH 2005). Os compostos de nitrila, ou Borrachas nitrílicas (NBR) são materiais de vedação de uso geral muito amplo com o benefício de boas propriedades mecânicas, resiliência razoável, boas propriedades de desgaste e resistência à maioria dos óleos e graxas à base de minerais. Também adequado para uso com água, fluidos hidráulicos resistentes ao fogo (, muitos ácidos diluídos, GLP, diesel e outros óleos combustíveis. Portanto, encontra aplicação muito ampla em muitos setores da indústria para vedações estáticas e dinâmicas (FLITNEY 2007).

Blendas de borracha nitrílica e PVC são consideravelmente estudadas em diversas aplicações, foram umas das primeiras blendas poliméricas desenvolvidas com finalidades comerciais e apresentam até hoje grande interesse comercial (DROBNY 2007). Ainda segundo Drobny (2007), as blendas termoplásticas de PVC e NBR são produzidas quando o PVC é o polímero predominante. Normalmente, eles também contêm plastificantes líquidos para PVC, enchimentos, estabilizadores, dentre outros aditivos. Essas misturas preenchem a lacuna entre o PVC plastificado líquido convencional e a borracha curada com NBR convencional.

Estas blendas, quando formuladas adequadamente, são semelhantes à borracha na aparência e no toque. Elas são flexíveis a baixas temperaturas, possuem boa resistência ao rasgo e boa resistência à abrasão. Conforme Rodolfo Jr. et al. (2006) explica, a borracha nitrílica é um dos principais elastômeros utilizados nos compostos de PVC e as propriedades da NBR variam em função do teor dos comonômeros acrilonitrila e butadieno, sendo o acrilonitrila é responsável pelo caráter polar, ou seja, pela miscibilidade com o PVC. Quanto a variação do peso molecular, quanto maior melhor será as propriedades mecânicas do composto com NBR, mas em contrapartida também podem ocorrer dificuldades de processamento, devido a viscosidade que o fundido possa apresentar. O tamanho da partícula de NBR também deve ser compatível com a resina de PVC, pois quanto menor a partícula melhor ela pode ser dispersa e interagir com a matriz termoplástica. Quanto a melhoria de propriedades, a incorporação de borracha NBR em compostos de PVC confere resistência à abrasão, ao rasgamento, flexibilidade, propriedades sob tração, resistência a óleo, combustíveis e solventes e migração e perda de voláteis (RODOLFO Jr. et al. 2006).

Tais fatos demonstram que Blendas de PVC e NBR podem ter potencial de aplicação industrial, devido a diversidade de propriedades e aplicabilidade. Seguindo esta verificação, este trabalho teve como intuito a execução de uma análise para validar a aplicação de Blendas PVC/NBR como juntas de vedação industrial para ligações flangeadas por meio da avaliação de propriedades mecânicas inerentes a esta aplicação.

## **1.1 Justificativa**

O PVC é um polímero de ampla aplicação na indústria e, devido principalmente a gama de propriedades flexibilizadas pelo uso de aditivos e seu custo-benefício como um commodity, têm se destacado no desenvolvimento de inovações e em substituição de outros materiais. Devido a potencialidade de seu uso na aplicação de juntas de vedação em tubulações industriais e diante dos

resultados obtidos no trabalho “ESTUDO DE VIABILIDADE DE USO DA RESINA PVC PARA FABRICAÇÃO DE JUNTAS DE FLANGE PARA VEDAÇÃO DE TUBULAÇÕES DE UTILIDADES” realizado por Dantas et al. (2019) e o trabalho “AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS, MORFOLÓGICAS E DE DUREZA EM BLENDA PVC/NBR APLICADO EM JUNTAS INDUSTRIAIS” realizado por Marçal & Martins (2020), esse estudo busca avaliar a viabilidade de inovação incremental do produto como junta de vedação ampliando ainda mais a gama de aplicações para o uso do PVC.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Avaliar a viabilidade do uso do PVC/NBR na aplicação de juntas de vedação em tubulações industrial e também contribuir com as possibilidades de uso do PVC, produto que está passando por vários estudos para ampliação de seu uso e desenvolvimento de novas tecnologias.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- a) Avaliar as propriedades térmicas e mecânicas resultantes dos testes realizados pela Teadit e SENAI CIMATEC;
- b) Avaliar os resultados dos ensaios por meio do Planejamento experimental para ter o auxílio do embasamento estatístico;
- c) Determinação da formulação de melhor aplicabilidade, com as devidas sugestões para aplicação.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Polímeros**

Polímero, literalmente, significa “muitas partes”. Um material polimérico sólido pode ser considerado aquele que contém muitas partes quimicamente ligadas ou

unidades que são ligadas para formar um sólido. Plásticos, como também são chamados, podem ser divididos em duas classes, termoplásticos e termofixos, dependendo de como são ligados quimicamente e estruturalmente. Elastômeros ou borrachas, é uma classe intermediária entre os termoplásticos e os termofixos que não são fusíveis, mas apresentam alta elasticidade, podem ser plasticamente deformados em grande quantidade quando uma força é aplicada, podendo retornar a sua forma original, ou quase, quando a força é liberada (SMITH & HASHEMI 2012).

Termoplásticos são polímeros que podem ser amolecidos pelo calor para serem processados na forma desejada. Os termoplásticos podem ser recuperados e refabricados pela aplicação de calor e pressão. Alguns exemplos dos principais termoplásticos são as poliolefinas (por exemplo, polietileno e polipropileno) e poli (cloreto de vinila). Em comparação, os termofixos são polímeros cujas cadeias individuais foram quimicamente ligadas por ligações covalentes durante a polimerização ou por subsequente tratamento químico ou térmico durante a fabricação. Uma vez formadas, essas redes reticuladas resistem ao amolecimento térmico, deformação mecânica e ataque de solventes, mas não podem ser processadas termicamente. Tais propriedades tornam os termofixos adequados para aplicações em compósitos, revestimentos e adesivos. Os principais exemplos de termofixos incluem epóxi, resinas de fenol-formaldeído e poliésteres não saturados que são usados na fabricação de compósitos reforçados com vidro (FRIED 2014).

Os elastômeros podem ser classificados de maneira geral como pertencentes a um dos três grupos: elastômeros de dieno, elastômeros não-dienos e elastômeros termoplásticos. Elastômeros de dieno, como polibutadieno, poli-isopreno e policloropreno, são polimerizados a partir de monômeros contendo duas ligações duplas sequenciais (um dieno) como a estrutura na Figura 1, em que R representa um grupo substituinte tal como um átomo de hidrogênio (no caso de polibutadieno), um átomo de cloro (em policloropreno) ou um grupo metil (em

poli-isopreno). A polimerização resulta em uma unidade de repetição que contém uma ligação dupla única que pode fornecer um local para reticulação subsequente, ou seja, vulcanização. Os elastômeros não-dienos incluem poliisobutileno, polissiloxanos (borracha de silicone) e outros elastômeros especiais, como poliuretano ou fluoroelastômeros. Os elastômeros não-dienos não possuem locais não saturados e, portanto, a reticulação requer métodos alternativos à vulcanização, como o uso de monômeros trifuncionais no caso de polimerizações de condensação (por exemplo, polissiloxanos), o uso de iniciadores de radicais livres ou a copolimerização com um pequeno quantidade de um monômero de dieno (por exemplo, butadieno). Elastômeros termoplásticos, como o terpolímero SBS, são termoplásticos que contêm segmentos rígido ("vítreo") e macio ("borracha") que podem ser processados termicamente, diferentemente dos elastômeros quimicamente reticulados. Após o resfriamento, os segmentos macio e rígido se separam em fase em domínios fisicamente distintos, pelo que os domínios rígidos servem como âncoras físicas para os segmentos de borracha e, desse modo, fornecem uma força de restauração quando o elastômero termoplástico é esticado (FRIED 2014).

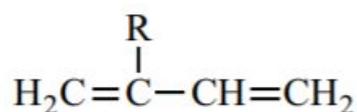


Figura 1. Monômeros contendo duas ligações duplas sequenciais. Fonte: (FRIED 2014)

De acordo com Canevarolo (2010), uma cadeia polimérica é uma macromolécula, formada formada a partir de unidades de repetição(meros) unidas por ligações primárias fortes. Estas são chamadas de intramoleculares, pois dizem a respeito às ligações dentro de uma mesma molécula, normalmente do tipo covalente, por outro lado, as distintas cadeias poliméricas, ou segmentos de uma mesma cadeia, se atraem por forças secundárias fracas, ditas intermoleculares. Entender estas ligações, a estrutura e composição dos monômeros e o tamanho

das cadeias são fundamentais para entender as propriedades dos polímeros. Os polímeros são originados através de reações químicas a dos monômeros, que dentro da cadeia polimérica se repetem na forma de meros. A forma de uma cadeia polimérica pode ser classificada em Linear, quando os meros são ligados entre si como um fio, Reticulada, quando são ligados de forma tridimensional e Ramificada se a cadeia possui ramificações laterais, além de outras formas conforme mostrado na Figura 2 (CANEVAROLO 2010).

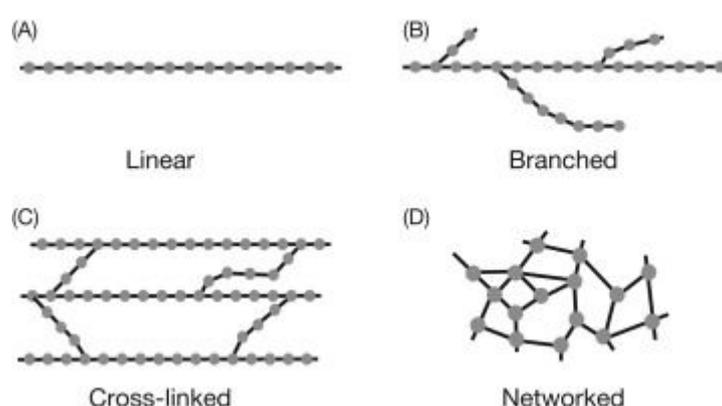


Figura 2. Formas de cadeia polimérica: a) linear; b) ramificada; c) com ligações cruzadas ou reticulada e d) "network". Fonte: (WANG et al. 2018).

## 2.2. Policloreto de vinila (PVC)

O policloreto de vinila, conhecido também como cloreto de vinila (monômero), policloreto de vinil, pelo nome IUPAC policloroetano ou pelo acrônimo PVC (originado do seu nome em inglês *Polyvinyl chloride*) é um termoplástico produzido em forma de pó muito fino com coloração branca, com alta massa molar, rígido, quebradiço, totalmente inerte, impermeável, bom isolante térmico, elétrico ou acústico e 100% reciclável. É o mais versátil plástico pois, devido à necessidade de a resina ser formulada com a incorporação de aditivos, de acordo com a aplicação de destino, o PVC pode ter suas características alteradas dentro de uma grande gama de propriedades, variando desde o rígido ao extremamente flexível, passando por aplicações que vão desde tubos e perfis rígidos para uso na Construção Civil até brinquedos e laminados flexíveis para acondicionamento de

sangue e plasma. A grande versatilidade do PVC deve-se também à sua adequação aos mais diferentes processos de moldagem, podendo ser injetado, extrudado, calandrado, espalmado, dentre outros. Considerando que o PVC é totalmente atóxico e inerte, a escolha de aditivos com essas mesmas características permite a fabricação de filmes, lacres e laminados para embalagens, brinquedos e acessórios médico-hospitalares, como mangueiras para sorologia e cateteres (RODOLFO Jr & NUNES & ORMANJI 2002).

Quanto suas vantagens, PVC é extremamente econômico em comparação com outros plásticos com um alto grau de versatilidade nas possibilidades de uso e processamento final. É durável, tem fácil manutenção e pode ser produzido em uma ampla gama de cores. O desgaste externo também é extremamente bom a partir de material adequadamente formulado. O PVC pode ainda ser usado para contato com alimentos e aplicações médicas. A clareza da cor é boa. Possui uma boa combinação de rigidez (particularmente com baixa espessura de parede) e resistência ao impacto, ligadas à não inflamabilidade em uso rígido. A estabilidade dimensional também é boa em temperaturas ambientes. Possui resistência a muitos produtos químicos, óleos e graxas diferentes e também possui boas propriedades de barreira ao vapor de água. Na sua forma flexível, possui boas propriedades de isolamento elétrico. Também possui alta relação resistência / peso com tenacidade e pode ser processado com diferentes técnicas (PATRICK 2005).

Quanto suas limitações, em comparação com outros termoplásticos, as temperaturas de transição vítrea e amolecimento são relativamente baixas. A temperatura de serviço contínuo também é relativamente baixa. É mais difícil o processo de fusão, devido à estabilidade térmica e problemas de alto cisalhamento, por exemplo, a moldagem por injeção de uPVC(PVC não-flêxivel ou rígido) não é simples. Outra limitação é que o uPVC possui uma resistência limitada à quebra por estresse de solvente e se torna quebradiço a baixas temperaturas (PATRICK 2005).

A obtenção do monômero do PVC, o MVC( Monôcloro de vinila) se dá a partir do DCE (Dicloro Etano) gerado a partir do óleo cru de petróleo que passa por uma destilação na qual é obtida a nafta leve. Conforme explica o INSTITUTO BRASILEIRO DE PVC (2020), O eteno é obtido por meio de processos de craqueamento catalítico (quebra de moléculas grandes em moléculas menores com a ação de catalisadores para aceleração do processo) da nafta e tanto o cloro como o eteno estão na fase gasosa e é da reação dos dois que é produzido o DCE. As moléculas de MVC podem ser submetidas a diversos processos de polimerização, ou seja, elas se ligam formando uma macromolécula de PVC, estes processos podem ser polimerização via radicais livres, polimerização em suspensão (80% do PVC no mundo é produzido desta forma), polimerização em emulsão e micro-suspensão, polimerização em massa ou polimerização em solução (RODOLFO Jr & NUNES & ORMANJI 2002). O mero e o monômero do PVC são demonstrados na Figura 3.

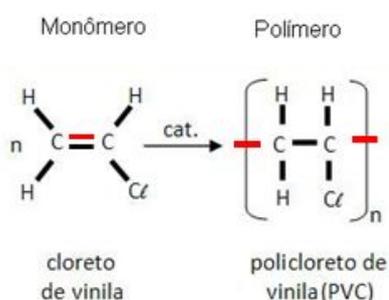


Figura 3. Monômero do Cloreto de vinila (a esquerda) e os “meros” do Policloreto de vinila (a direita). Fonte: (USP).

No processo de polimerização em suspensão, o Cloreto de vinila é disperso na forma de gotas de diâmetro entre 30 e 150  $\mu\text{m}$ , misturado em meio a uma fase aquosa, por agitação vigorosa e na presença de um colóide protetor, também chamado dispersante ou agente de suspensão. É então utilizado um iniciador solúvel no monômero para que assim a reação de polimerização possa ocorrer dentro das gotas em suspensão, por um mecanismo de reações em cadeia via radicais livres. O carregamento no reator onde ocorre a polimerização por

suspensão é normalmente iniciado com a mistura de água desmineralizada, aditivos de polimerização, dispersantes (na forma de solução) e iniciadores. Com o reator selado, é feito um alto vácuo para eliminar ao máximo o oxigênio do meio reacional, que pode gerar efeitos adversos durante o processo de polimerização do PVC, podendo aumentar o tempo de reação e afetar as propriedades do produto final. Após o vácuo no reator, faz-se a carga do monômero cloreto de vinila liquefeito e o aquecimento da camisa do reator com vapor sob pressão, para início da reação. Uma vez que a reação é iniciada, o reator deixa de ser aquecido e passa a ser resfriado, pois a reação é exotérmica. A temperatura de reação, geralmente na faixa entre 50 e 70 °C, é o principal parâmetro para definição do peso molecular da resina, geralmente expresso pelo valor K. Sendo a conversão da reação atingida, geralmente na faixa dos 75 aos 95%, a reação é encerrada e o monômero remanescente é recuperado.

O polímero obtido na forma de lama passa, então, por um processo de *stripping*, no qual o monômero cloreto de vinila remanescente é extraído por meio da aplicação de vácuo e temperatura, tanto em reatores comuns quanto em torres, nas quais a lama é submetida a contracorrente de vapor sob pressão. Esta lama obtida segue para um processo de concentração via centrifugação, e o composto resultante é seco em secadores de leito fluidizado. A resina seca segue por peneiras para retenção de partículas extremamente grosseiras e armazenada em silos, então segue para acondicionamento em diferentes sistemas de distribuição aos clientes, tais como sacarias de 25 kg, big bags de 1,2 T ou mais e mesmo até caminhões-silo (RODOLFO Jr & NUNES & ORMANJI 2002). A Figura 4 mostra uma representação esquemática de como é este processo de polimerização em suspensão do PVC.

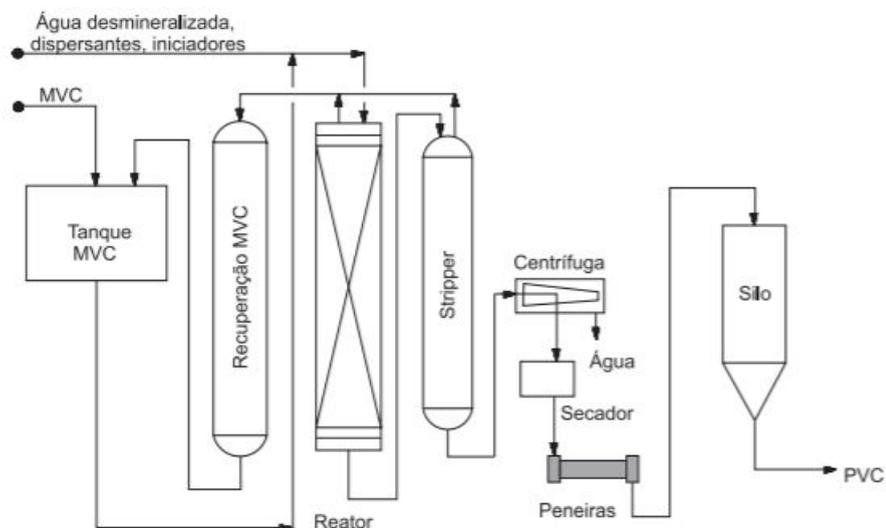


Figura 4. Representação esquemática do processo de polimerização em suspensão do PVC. Fonte: (RODOLFO Jr & NUNES & ORMANJI 2002).

Alguns dos aspectos do PVC obtido por polimerização em suspensão e em massa consistem em partículas com diâmetro normalmente na faixa de 50 a 200  $\mu\text{m}$ , que é uma faixa de tamanho adequada tanto do ponto de vista das dificuldades de manipulação e riscos ocupacionais, no caso de partículas muito pequenas, quanto no sentido de evitar instabilidades na suspensão (a ponto de solidificar a carga no reator), no caso de partículas muito grosseiras. Uma característica relevante é que o PVC pode ser considerado um polímero amorfo ou de baixa cristalinidade, sendo que este fator varia conforme as condições de polimerização. Polímeros comerciais possuem cristalinidade na ordem de 8 a 10%, mas em certas condições é possível aumentar significativamente esse valor. Polimerizações a 5 °C geram PVC com cristalinidade da ordem de 15%, se a polimerização for realizada a -75 °C a cristalinidade obtida será de cerca de 30%. Os cristalitos do PVC são pequenos, apresentando granulometria de cerca de 0,7 nm (3 unidades repetitivas) na direção da cadeia, e são empacotados lateralmente em dimensões relativamente maiores, da ordem de 4,1 nm, como mostrado na Figura 5 (RODOLFO Jr & NUNES & ORMANJI 2002).

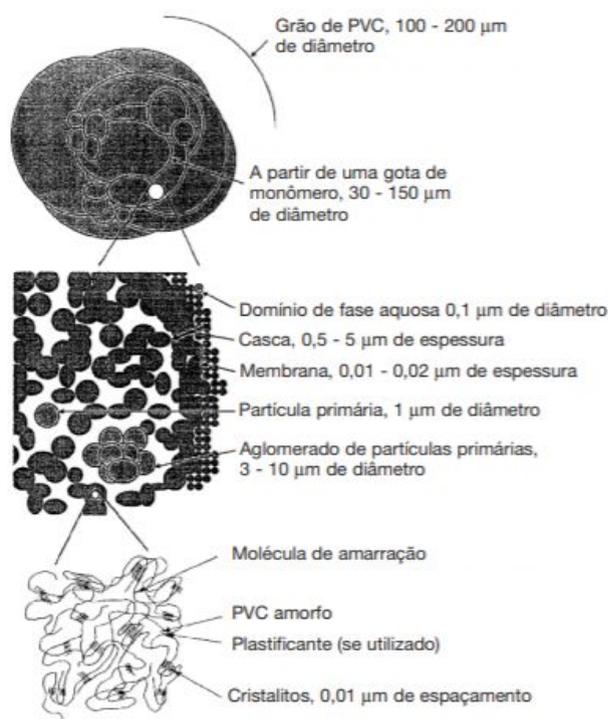


Figura 5. Representação esquemática das espécies presentes na morfologia de partícula do PVC obtido pelo processo de polimerização em suspensão. Fonte: (RODOLFO Jr & NUNES & ORMANJI 2002).

Quanto a aditivação, alguns dos principais aditivos que são incluídos em uma formulação de PVC são estabilizadores de calor, necessários em todos os casos para neutralizar a instabilidade térmica inerente das resinas de PVC (especialmente nas altas temperaturas de processamento). Outros também funcionam como auxiliares no processamento (por exemplo, certos modificadores poliméricos, lubrificantes), enquanto outros ainda (por exemplo plastificantes, cargas) modificam as propriedades do material para fornecer a ampla versatilidade de aplicação que torna o PVC tão importante entre os principais termoplásticos. Em termos da extensão do seu efeito sobre as propriedades do material do PVC, os plastificantes são o grupo mais importante de aditivos. As composições de PVC que incorporam plastificantes (e os materiais e produtos feitos com essas composições) são conhecidas como PVC plastificado (às vezes abreviado para

pPVC). Este PVC, chamado também de PVC *flexível*, ou PVC *macio*, contém plastificantes em quantidades altas o suficiente para conferir essas propriedades ao material. As composições e produtos de PVC que não incorporam plastificantes são comumente chamados de PVC não plastificado (uPVC) ou PVC *rígido*, embora o último termo se estenda adequadamente também a materiais de PVC que podem conter alguns plastificantes, mas em proporção insuficiente para reduzir consideravelmente o módulo de elasticidade. Os materiais plastificados cujo conteúdo do plastificante, embora geralmente baixo, reduz o módulo de elasticidade (e geralmente a resistência e a dureza) em comparação com o uPVC, mas apenas para valores ainda maiores do que os normais para o PVC flexível ou macio, são algumas vezes chamados de PVC *semi-rígidos* (TITOW 1986).

Quanto a capacidade do PVC de formar blendas com outros termoplásticos e elastômeros, apesar de sua ampla versatilidade, os compostos de PVC exibem limitações que podem fazer necessária a incorporação de outros polímeros nas formulações rígidas ou flexíveis, em geral para aplicações especiais que eventualmente permitam maiores custos em relação aos compostos tradicionais. Os principais critérios para a seleção do termoplásticos ou elastômero a formar uma blenda com o PVC são a Pré-mistura, que deve ser homogênea necessitando de um material igualmente em pó para evitar segregações, o Fluxo, pois o material deve apresentar características de fluxo e ponto de amolecimento compatíveis com o PVC, a Miscibilidade, condições de processamento similares a do PVC, deve trazer melhorias na propriedade do PVC e não haver um grande incremento de custo ao incorporar o termoplásticos ou elastômero no PVC (RODOLFO Jr & NUNES & ORMANJI 2002).

Quanto ao processamento do PVC, a mistura íntima da resina de cloreto de polivinila com aditivos apropriados é necessária antes da conversão em uma fusão termoplástica (PATRICK 2005). A mistura da resina de PVC com os aditivos é normalmente realizada em misturadores intensivos do tipo batedeira, também denominados turbomisturadores ou misturadores de alta velocidade, e tanto para

PVC rígidos ou flexíveis pode haver a adição de aditivos como lubrificantes, plastificantes, pigmentos ou cargas. A conversão de compostos de PVC, tanto rígidos quanto flexíveis, em produtos finais moldados através de um processo de transformação depende de um fenômeno conhecido como gelificação (ou gelação) da resina de PVC. O processo de gelificação do composto de PVC é realizado através da aplicação de cisalhamento e temperatura, processo este conhecido por malaxação. Quando calor e cisalhamento são aplicados ao composto de PVC ocorrem tanto fluxo de partículas (fluxo particulado) quanto fluxo molecular deformacional. Dentre os processamentos que o PVC pode ser submetido pode-se citar a Moldagem por Extrusão, Injeção, Sopro, Calandragem, Espalmagem, *Slush moulding*, Imersão, dentre outros (RODOLFO Jr & NUNES & ORMANJI 2002).

Para este trabalho, vale-se destacar o processamento por Calandragem que consiste na alimentação do PVC, previamente fundido, entre dois cilindros de alimentação que o comprimem para então ser formado um filme ou chapa de espessura desejada, obtida por meio da passagem posterior do composto pela abertura de uma seqüência de cilindros. A espessura do filme é controlada pela abertura dos rolos finais da calandra, e seu acabamento superficial é determinado pelo acabamento da superfície do último cilindro de passagem, podendo variar desde o extremamente brilhante até o fosco, ou ainda gofrado em uma variedade de texturas. O filme ou chapa, após deixar a calandra, pode simplesmente ser resfriado, embobinado ou cortado em tamanhos e dimensões desejadas, ou ainda laminado enquanto quente sobre uma base contínua de papel ou tecido. As principais vantagens do processo de calandragem para obtenção de laminados em relação à extrusão através de matriz plana são a maior produtividade, excelente controle de espessura (permitindo inclusive sua automação) e possibilidade de produção contínua por períodos de tempo mais prolongados sem a necessidade de parada da linha para limpeza. Essas vantagens são as maiores responsáveis pelo fato de a maioria dos laminados de PVC serem produzidos por calandragem, apesar da maior necessidade de investimento de capital em equipamentos e

menor flexibilidade de operação para pequenas produções (RODOLFO Jr & NUNES & ORMANJI 2002).

O estado final do PVC e a maneira pela qual suas características são influenciadas dependem do processamento pelo qual passou. Devido à forma como o produto final é formado pelas calandras, ele difere das folhas extrudadas em algumas características morfológicas e em certas propriedades associadas a elas. As propriedades do núcleo do PVC calandrado são influenciadas pela uniformidade da alimentação do calandra e pela uniformidade e homogeneidade da composição da mistura de materiais. O resfriamento diferencial das superfícies da chapa e do núcleo tende a criar tensões no último. Eles podem ser agravados pontualmente por alimentação não uniforme e irregularidades no banco de alimentação, como, por exemplo, partes da faixa de alimentação que encontram seu caminho diretamente para o material que é formado pelo bico de alimentação: isso pode dar origem a estrias frias no núcleo, com conseqüente criação de estresse localizado. A extensão do desenvolvimento da morfologia da superfície e do núcleo, juntamente com as tensões regulares e tensões locais adicionais, afetam as propriedades de resistência da placa e afetam sua capacidade de permanecer plana. Eles também podem causar problemas no serviço (por exemplo, rugas) devido à recuperação da tensão (TITOW 1986).

### **2.3. Borracha Nitrílica (NBR)**

De todos os elastômeros sintéticos, os copolímeros de polibutadieno (BR) e butadieno são uns dos mais utilizados, possuindo uma grande produção no mundo. O polibutadieno possui boa resiliência e resistência à abrasão e baixo acúmulo de calor, que são propriedades importantes para diversas aplicações. Dentre as diversas copolimerizações que o polibutadieno pode fazer destaca-se a com a acrilonitrila, com percentual aproximado de 15% a 40% de acrilonitrila, por meio da polimerização por emulsão de radicais livres quente ou fria. O elastômero

resultante, NBR ou borracha nitrílica, devido a sua polaridade, possui uma melhoria na resistência a óleos e solventes aromáticos e, portanto, pode ser usado como material para juntas, tubos, anéis de tubulação, e mangueiras de gasolina(FRIED 2014).

Quanto a sua aplicação, o uso de NBR é dominante no campo petrolífero, usado em preventores, empacotadores e vedações. No entanto, poços de gás ácido contendo inibidores de corrosão de sulfeto de hidrogênio e amina têm sido um problema para componentes baseados em NBR porque ambos os produtos químicos podem degradar elastômeros de nitrila causando fragilização. O outro uso principal da NBR é no setor automotivo. No entanto, à medida que as temperaturas "sob o capô" aumentam com o fluxo de ar reduzido e compartimentos menores do motor, podem ser identificados problemas quanto a resistência ao envelhecimento térmico desse elastômero. Também, Hidroperóxidos podem às vezes se formar na gasolina e isso pode ser prejudicial para a NBR simples, neste caso podem ser utilizadas variações mais resistentes quimicamente como a NBR de alto acrilonitrila ou blendas NBR/PVC (CIESIELSKI 1999).

Quando a emulsão da NBR é realizada a quente, as borrachas resultantes apresentam melhores propriedades de adesão, flexibilidade e deformação permanente por compressão. Já para a emulsão a frio, fará as borrachas apresentarem melhores características físicas e serem mais fáceis de processar (PASSADOR 2006). Sua estrutura molecular é mostrada na Figura 6.

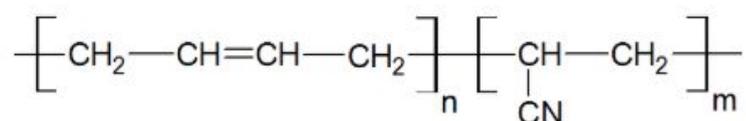


Figura 6. Estrutura molecular dos meros de repetição da Borracha de Butadieno Acrilonitrila. Fonte: (*Polymer Properties Database*).

Muitas propriedades podem ser ajustadas variando o percentual de acrilonitrila na borracha nitrílica. Quanto maior o teor de nitrila, maior a resistência aos hidrocarbonetos aromáticos e apresenta um Tg mais alto, e quanto menor o teor de nitrila, melhor a flexibilidade a baixa temperatura (WHITE & DE 2001). A faixa de temperatura de trabalho típica da NBR é cerca de -25 °C a +100 °C. Alguns materiais com baixo teor de acrilonitrila são adequados para aplicação até -50 °C e alguns curados com peróxido podem ser aplicados a até +150 °C. Ao se obter blendas com a NBR e com resinas termoplásticas compatíveis com os aditivos poliméricos convenientes, é possível se obter propriedades adicionais como resistência à chama, resistência ao mofo, soldabilidade térmica e adesão a tecidos e metais como afirmam White e De (2001). Considerando a polaridade da NBR e do PVC, portanto, as duas resinas podem ser consideradas miscíveis, como também afirma Passador (2006).

#### **2.4. Blendas PVC/NBR**

As blendas de PVC/NBR têm cada vez ganhado mais visibilidade devido a possibilidade de melhoria nas suas propriedades com sua mistura um deles é a tenacidade. A mistura e a dispersão da borracha são os fatores de maior importância pois o nível de mistura é quem vai determinar as propriedades que serão melhoradas. O PVC é o responsável pela morfologia das blendas PVC/NBR, quando há uma otimização de propriedades mecânicas as partículas de borracha estão randomicamente dispersas entre as partículas primárias de PVC.

As borrachas nitrílicas são um dos principais modificadores em compostos de PVC, atuando como plastificantes permanentes, e conferindo melhoria na resistência ao ozônio e resistência química a matriz de PVC, enquanto que o PVC melhora as propriedades de abrasão, rasgamento e tração da NBR. De acordo com Ghiou & Benaniba (2009) blendas de NBR com PVC plastificado são descritas como

termoplásticos elastômeros, pois combinam facilidade de processamento por fusão e flexibilidade e elasticidade de uma borracha.

Passador et al. (2006) ao citar os estudos de Liu et al. (1998) explica que nas misturas binárias de PVC e NBR observam-se três morfologias de dispersão e distribuição espacial das partículas de NBR( fase borrachosa), conforme mostrado na Figura 7, podendo se apresentarem em aglomerações, bem dispersas ou em *pseudo-networks*.

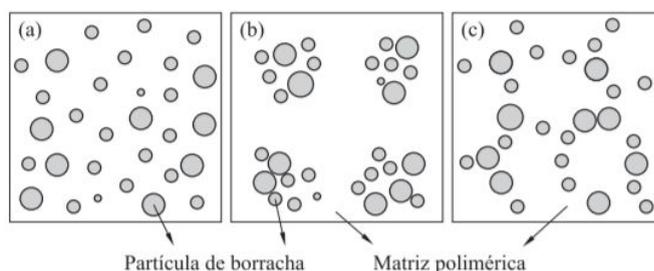


Figura 7. Esquema para as formas de distribuição espacial das partículas de borracha: a) bem dispersa; b) aglomerada; c) pseudo-network. Fonte: (PASSADOR et al. 2006).

Quanto a dispersão de fases, podem ser definidas três formas, conhecidas como *pseudo-network*, *network* e partículas bem dispersas, como podem ser visualizadas a partir da Figura 8. A *pseudo-network* é indicada por partículas de borracha randomicamente dispersas entre as principais partículas da matriz de PVC. Já a *network* é composta por duas fases contínuas e as partículas primárias de PVC em maioria, estão na forma de estruturas particuladas (morfologia típica de PVC/NBR). O que se deseja em blendas poliméricas são partículas bem dispersas que influenciam na melhoria de propriedades como tração e tenacidade ou impacto. No último estado morfológico, partículas bem dispersas, o aumento da fração volumétrica da borracha gera o aumento das partículas da mesma. Esse fator é crítico visto que as propriedades das blendas poliméricas são fortemente influenciadas pelo tamanho e distribuição de tamanho das partículas (PASSADOR et al. 2006).

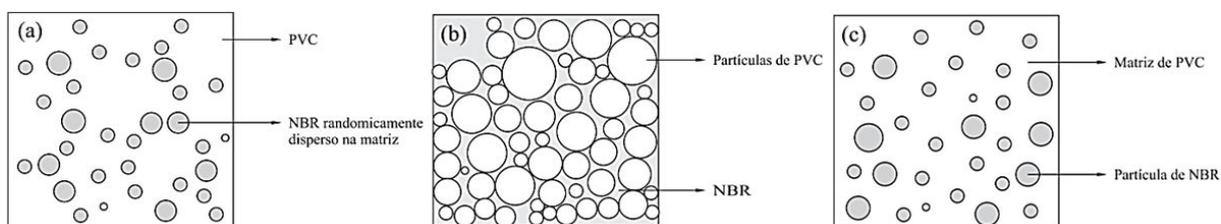


Figura 8. Esquema das formas de dispersão da fase borrachosa em blends de PVC e partículas de borracha: a) “pseudo-network”, b) “network”, c) partículas bem dispersas. Fonte: (PASSADOR et al. 2006).

## 2.5. Aditivação do PVC

### 2.5.1. Estabilizantes térmicos

A degradação térmica, ruptura de ligações químicas por temperatura, ocorre quando energias térmicas superiores à energia de ligação intramoleculares são adicionadas ao sistema independente da presença de oxigênio, portanto está ligada aos compostos químicos que compõem o polímero, este processo ocorre principalmente durante o processamento do material.

A degradação termo oxidativa é gerada pelo oxigênio atmosférico e outros oxidantes sendo ativada por processos térmicos, que ocorrem durante sua aplicação em temperaturas elevadas (Rabello, 2000). A degradação térmica no PVC possui diversos mecanismos que ocorrem de maneira simultânea, desidrocloração (liberação de cloreto de hidrogênio, HCl), auto-oxidação (Quando exposto a  $O_2$ ) e cisão mecano-química (durante o processamento).

Essas características trazem a necessidade de utilização de estabilizantes nas composições de PVC. Estabilizantes térmicos são aditivos que visam reduzir os efeitos de degradação por fatores térmicos de processamento e do ambiente de aplicação do polímero (Fink 2010). Estabilizantes de PVC são classificados como preventivos, atuando na eliminação de sítios de iniciação, desativando HCl e prevenindo oxidação ou Curativos que quebram as sequências poliênicas geradas na desidrocloração e destruindo os sais de carbênio gerados pela oxidação (Rabello, 2000).

### 2.5.2. Plastificantes

De acordo com Patrick (2005) os plastificantes são adicionados ao PVC para que este obtenha flexibilidade e boa processabilidade. A flexibilidade ou maciez é determinada pelo tipo de plastificante e teor utilizado em relação ao PVC (pcr). Eles também operam como um lubrificante interno entre as moléculas de PVC. Os plastificantes geralmente são em base os ésteres orgânicos de alto ponto de ebulição, por exemplo, ftalatos, adipatos, trimelitatos, fosfatos e assim por diante.

A resina de PVC é naturalmente rígida, desta forma, durante a produção dos compostos de PVC, os plastificantes são incorporados à resina de PVC de modo a gerar compostos flexíveis. Os teores de adição podem ser tão baixos quanto 20 pcr para obtenção de PVCs semi-rígidos a até 100 pcr para obter PVCs flexíveis (PATRICK 2005). Naturalmente no PVC, em função da presença do átomo de cloro, altamente eletronegativo, a molécula de PVC possui ligações químicas fortemente negativas nos átomos de cloro e positivas nos átomos de hidrogênio, ligados ao mesmo átomo de carbono. As moléculas de PVC sofrem forte atração eletrostática umas pelas outras devido à presença desses dipolos ao longo das cadeias, o que resulta em um polímero de característica rígida. Esse mecanismo de atração intermolecular, é conhecido como ligação secundária ou de van der Waals do tipo dipolo-dipolo (RODOLFO Jr et al. 2006).

Rodolfo Jr et al. (2006) explica que um plastificante pode reduzir a viscosidade do fundido, abaixar sua temperatura de transição de segunda ordem (temperatura de transição vítrea ou Tg) ou diminuir seu módulo de elasticidade e que para fins práticos, pode-se definir os plastificantes como toda e qualquer substância que, incorporada ao PVC, reduz sua dureza e aumenta sua flexibilidade.

Plastificantes para PVC de óleos epoxidados, como o utilizado neste trabalho, são conhecidos por terem uso primário como estabilizadores de calor de tipo secundário, mas também conferem flexibilidade (PATRICK 2005). São

compatíveis apenas com teores de adição relativamente baixos pois quando utilizados em altas concentrações podem apresentar problemas de migração (RODOLFO Jr et al. 2006).

### **2.5.3. Lubrificantes**

Os lubrificantes funcionam basicamente de duas maneiras, externamente para reduzir o atrito entre o polímero fundido e as superfícies metálicas quentes durante o processamento e internamente para reduzir as forças de atrito dentro da matriz polimérica, diminuindo assim a viscosidade efetiva. Os lubrificantes externos, por definição, têm pouca compatibilidade com o PVC e migram para a superfície para diminuir o atrito com o metal. Os lubrificantes internos são mais compatíveis, possuem alta polaridade e, portanto, são mais solúveis em PVC. Ambos os tipos são essenciais para o processamento de formulações de uPVC, principalmente considerando as diferentes condições de cisalhamento resultantes da extrusão, calandragem ou moldagem por injeção. Na prática, a maioria dos lubrificantes possui características externas e internas, mas varia na proporção de um para o outro no desempenho. O equilíbrio de teor na composição do PVC correto e o tipo de nível interno para externo são cruciais devido à influência no nível de gelificação, remoção de materiais incompatíveis no equipamento de matriz, calibração e propriedades físicas (PATRICK 2005).

Lubrificantes são utilizados tanto para PVC rígidos quanto para flexíveis. Para o PVC rígido recomenda-se a utilização tanto de lubrificantes internos quanto externos, devido sua maior dificuldade de processamento inerente. Os lubrificantes internos contribuem para um menor grau de degradação térmica durante o processamento devido a redução do atrito entre as moléculas do PVC no processamento. O uso destes lubrificantes nas formulações de PVC rígido pode ainda reduzir a temperatura do material fundido, a medida que o calor gerado pelo atrito interno entre as moléculas é reduzido. Devido à maior compatibilidade com

as moléculas do PVC, estes lubrificantes podem atuar também como pseudoplastificantes, reduzindo levemente as forças de atração entre as cadeias poliméricas do PVC, podendo assim facilitar o processo de gelificação e fusão do composto no processamento, mas o excesso de lubrificação interna pode também reduzir a Temperatura de Amolecimento Vicat do composto de PVC (RODOLFO Jr. et al. 2006).

#### **2.5.4. Antioxidantes**

Esse tipo de aditivo tem a função de impedir e delongar a ação da degradação oxidante em materiais. Nos polímeros, normalmente são adicionados durante a fase de processamento. Os antioxidantes podem ser classificados em primários e secundários. Os primários interrompem o ciclo de propagação na reação com os radicais, incluindo assim novas reações de terminação e os secundários destroem os hidroperóxidos, considerados iniciantes da oxidação de polímeros (RABELLO 2000). Ao falar do PVC, a sua degradação se dar pelo processo de oxidação da cadeia em hidroperóxidos contribuindo para o processo de catálise da desidrocloração, sendo assim os antioxidantes têm importante papel (RODOLFO Jr. 2007).

#### **2.5.5. Cargas Minerais**

As cargas minerais são classificadas como inorgânicas sendo utilizadas juntamente com resinas poliméricas com o objetivo de reforçar as propriedades físicas e reduzir custos no material final, normalmente composições de materiais poliméricos (RABELLO, 2000). Existem muitas cargas que podem ser incorporadas ao PVC, dentre as minerais pode-se citar o carbonato de cálcio, fibras de vidro, talco e algumas sílicas. Segundo Rodolfo Jr. (2006), quando a incorporação ocorre no início da mistura, parte dos aditivos líquidos podem ser absorvidos por elas,

alterando características dos compostos, como por exemplo, a dureza. Então, dependendo do teor da incorporação controlado, assim pode-se acrescentar propriedades imprescindíveis aos compostos de PVC, como a resistência mecânica e rigidez.

### **2.5.6. Pigmentos**

Pigmentos Segundo Rabello (2000) São aditivos utilizados para conferir tonalidades de cor aos materiais poliméricos.

Várias aplicações do PVC exigem a utilização de pigmentos seja para uma solução estética ou para uma solução prática na proteção contra raios UV, melhorando sua aplicabilidade. A seleção do pigmento utilizado deve levar em conta os outros aditivos selecionados para a formulação do PVC (ALMEIDA 2005).

Os pigmentos podem ser utilizados de várias formas, pó fino e seco, mistura seca, pasta ou *masterbatch*, sendo todas estas pré dispersas após um processo de desagregação no desenvolvimento da cor (ALMEIDA 2005).

Para a seleção do pigmento a ser utilizado devem-se levar em conta os seguintes aspectos:

- Cor desejada;
- Limitações no processamento;
- Afinidade com os demais aditivos;
- Aplicação final;
- Custo.

## 2.6. Juntas Industriais.

### 2.6.1. Ligações Flangeadas

São chamados de Elementos de vedação os equipamentos usados para impedir a passagem, de forma estática ou dinâmica, de líquidos, gases ou sólidos particulados de um meio para outro. As Juntas são elementos de vedação empregados em partes estáticas, principalmente associado à Flanges, e podem ser feitos de diversas classes de materiais e diferentes formatos de acordo com as dimensões da flange ou tubulação aplicada. De acordo com Telles (2001) uma ligação flangeada é composta de dois flanges, um jogo de parafusos ou estojos com porcas e uma junta de vedação conforme é mostrado no esquema da Figura 9. Essas ligações flangeadas são facilmente desmontáveis e empregam-se principalmente para tubos de 2”(50,8mm), ligando válvulas com equipamentos (como bombas, compressores, tanques, vasos, dentre outros), regiões onde seja necessária facilidade para desmontagem (como em casos de limpeza interna) ou em tubulações de aço que possuam revestimento interno anticorrosivo pois permitem a perfeita continuidade destes segmentos revestidos (TELLES 2001).

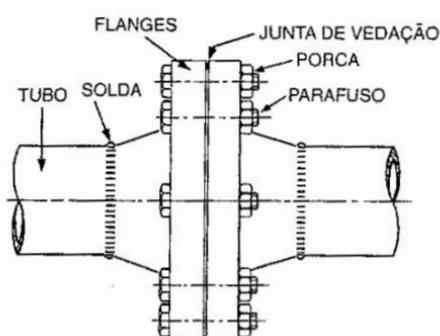


Figura 9. Esquema de uma ligação flangeada. Fonte: (TELLES 2001).

Como explicado por Telles (2001), as flanges podem ser de três principais tipos de acordo com a superfície de vedação. O tipo mais comum é o de Face

ressaltada (*Raised Face* ou RF) que pode se adequar a diversas condições de trabalho na indústria com diferentes pressões e temperaturas. A face ressaltada apresenta ainda uma vantagem relacionada à manutenção, sendo possível trocar a junta sem que seja necessário retirar todos os parafusos e afastar muito os flanges. As de Face Plana (*Flat Face* ou FF) são mais comuns em ligações flangeadas de plástico ou ferro fundido, que são materiais mais frágeis que o aço. Há também a flange de Face para Junta de Anel (*Ring Type Joint* ou RTJ) que é mais utilizada em flanges feitas de aço que trabalham em condições com pressão e temperatura mais severas. Neste tipo de flange há uma cavidade de seção trapezoidal projetada para receber a junta de anel metálico. a pressão interna tem papel fundamental no desempenho da junta neste caso, porque tende a dilata-la e comprimi-la contra a parede da cavidade do flange. É importante que a dureza do material que constitui a face do flange seja maior que a do metal da junta (RODRIGUES 2016). Representações dos três tipos de flanges pode ser vista a Figura 10.

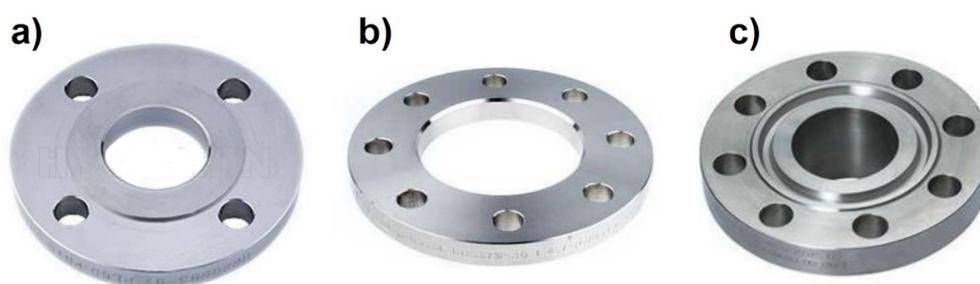


Figura 10. Representações dos três tipos de Flange: a)Face ressaltada (*Raised Face* ou RF) , b)Face Plana(*Flat Face* ou FF) e c)Face para Junta de Anel (*Ring Type Joint* ou RTJ). Fonte: (RODRIGUES 2016).

### 2.6.2. Juntas para Flanges

A junta, como elemento de vedação, quando aplicada em flanges é submetida a uma forte compressão gerada pelo aperto dos parafusos, assim como também a um esforço de cisalhamento devido à pressão interna do fluido circulante, como

afirma Telles (2001). Dessa forma a pressão exercida pelos parafusos precisa ser superior a pressão interna do fluido para que não haja vazamento através da junta, para isso, a medida que a pressão do fluido seja maior, mais dura e mais resistente deve ser a junta, para resistir ao duplo esforço de compressão dos parafusos e de cisalhamento pela pressão. A junta também deve ser suficientemente deformável e elástica para se moldar às irregularidades das superfícies dos flanges, garantindo assim uma correta vedação. Assim como a flange, a junta deve ser resistente a à ação corrosiva do fluido, bem como a faixa de temperatura de trabalho a ser submetida (TELLES 2001).

Segundo Telles (2001), assim como para Antaki (2005), pode-se definir as juntas de vedação para flanges em três tipos de acordo com o tipo de material:

#### **2.6.2.1. Juntas Não-metálicas:**

Podem ser encontradas em grande variedade de materiais, como borracha sintética nitrílica (NBR) ou de estireno (SBR) puras ou reforçadas com fibra de aramida, borracha natural, elastômeros de butil ou isobutileno, Neoprene, etileno propileno-dieno (EPDM), Teflon virgem ou reforçado, resinas de PTFE reforçado com vidro, grafite flexível, dentre outros (ANTAKI 2005). São utilizadas em flanges de face plana (FF) ou ressaltada (RF), no caso de ressaltada, o ressalto pode ter as ranhuras espiraladas convencionais. Suas espessuras variam de 0,7 a 3,0mm, sendo que a espessura mais comum é de 1,5mm (TELLES 2001). Um exemplo de junta não-metálica pode ser visualizado na Figura 11.



Figura 11. Exemplo de uma junta não-metálica, de Fibra de aramida e NBR.

Fonte: (TEADIT).

Telles (2001) classifica os tipos de usos conforme os seguintes tipos de materiais de juntas não-metálicas:

- a) **Borracha Natural:** Usadas para tubulações onde passam água ou ar condensado até 60°C;
- b) **Borrachas sintéticas:** Usadas para tubulações de óleos com temperatura até 80°C;
- c) **Materiais plásticos:** Usados para tubulações com fluidos corrosivos em baixas pressões e temperatura ambiente;
- d) **Papelão hidráulico:** Nome genérico para diversas classes de juntas de amianto grafitado comprimido com um material aglutinante.

Os materiais para Juntas não-metálicas mais utilizados para vedação de flanges são o Papelão hidráulico e o Politetrafluoroetileno (PTFE), conhecido também pelo nome comercial Teflon conforme explica Veiga (2014).

O grande uso do Papelão hidráulico deve-se a sua boa selabilidade em uma grande gama de condições operacionais, possuindo também elevada resistência ao esmagamento, baixo relaxamento e é resistente a altas temperaturas e pressões, assim como a diversos produtos químicos. O Papelão hidráulico é fabricado por meio da vulcanização sob pressão de elastômeros (NR: borracha natural, SBR: borracha estireno-butadieno, CR: cloropreno ou NBR: borracha nitrílica) com fibras naturais, artificiais ou sintéticas e aditivos. Possuem um bom balanço custo x desempenho, sendo bem econômico. Estas juntas também podem ser reforçadas com metais, geralmente aço carbono, para aplicações onde a junta está sujeita a quebras durante o manuseio (VEIGAS 2014). Em sua composição, as fibras possuem uma função estrutural, conferindo alta resistência mecânica à junta. Já os elastômeros possibilitam uma melhor resistência química, flexibilidade e elasticidade a junta (DANTAS et al. 2019).

Já as juntas de PTFE são relativamente caras em comparação aos outros materiais de juntas como afirma Rodrigues (2016), mas são bastante utilizados, principalmente na indústria de celulose e açúcar por possuírem excelente resistência química, sendo atacados somente por metais alcalinos em estado líquido e o flúor livre. Possui também excelente capacidade de isolamento elétrico, anti-aderência, resistência ao impacto e baixo coeficiente de atrito. Podem ser fabricadas por moldagem e sinterização, usinada, laminada, com PTFE expandido ou em placas (VIEGAS 2014).

#### **2.6.2.2. Juntas Semi Metálicas:**

Uma junta semi-metálica consiste em um material de enchimento (como grafite, amianto ou *Teflon*) com recobrimento em sanduíche de de metal (como aço inoxidável) ou enrolado em espiral. Nas juntas em espiral, o anel de metal externo serve para centralizar a junta e evitar ruptura, e o anel de metal interno serve para evitar flambagem interna dos enrolamentos internos da junta, se estiver excessivamente comprimida. O metal utilizado pode ser aço carbono ou aço inoxidável, bem como ligas de níquel, cobre ou alumínio. Juntas semi-metálicas geralmente podem ser usadas em pressões e temperaturas mais altas do que as juntas não-metálicas (ANTAKI 2005). Um exemplo de junta semi metálica pode ser visualizado na Figura 12.



Figura 12. Exemplo de uma junta semi metálica. Fonte: (RODRIGUES 2016).

### 2.6.2.3. Juntas Metálicas:

Juntas metálicas são feitas de um anel metálico sólido que é posicionado entre as duas faces do flange. É aplicado em casos de alta pressão e temperatura, geralmente acima de 5000 psi, em flanges tanto em tubos quanto de vasos de pressão. O torque do parafuso deve ser muito alto para manter o anel de metal dentro da ranhura da flange e cumprir sua função de vedação. Além disso, a dureza do anel deve ser menor que a dureza do flange, para que o anel, e não o flange, ceda no ponto de contato. Além disso, a ranhura do flange deve ser suficientemente suave para evitar possíveis concentrações de tensão. Algumas flanges grandes podem se romper na borda do canto da ranhura devido a grandes tensões nos rolamentos impostas pelo anel da junta (ANTAKI 2005). Exemplos de juntas metálicas são mostrados na Figura 13.



Figura 13. Exemplos de juntas metálicas. Fonte: (TEADIT).

Conforme explica Telles (2001), juntas metálicas podem ter diversos tipos, um deste é a Junta metálica folheada. Estas juntas geralmente possuem espessura de 2 a 3mm e podem apresentar vedação mais difícil, exigindo um acabamento liso com rugosidade média máxima de 0,002mm ou ranhuras concêntricas. Há também as Juntas metálicas maciças, que podem apresentar face plana ou com ranhuras e são utilizadas com flanges de face ressaltada (RF) devido a maior precisão.

Também pode ser listada a Junta metálica de anel (JTA) que é formada por anéis maciços de seção ovalada ou octogonal, sendo a ovalada a mais comum. As dimensões destes anéis variam de acordo com o diâmetro e classe de pressão da flange de aplicação. Representações dos tipos de juntas metálicas são demonstradas na Figura 14.

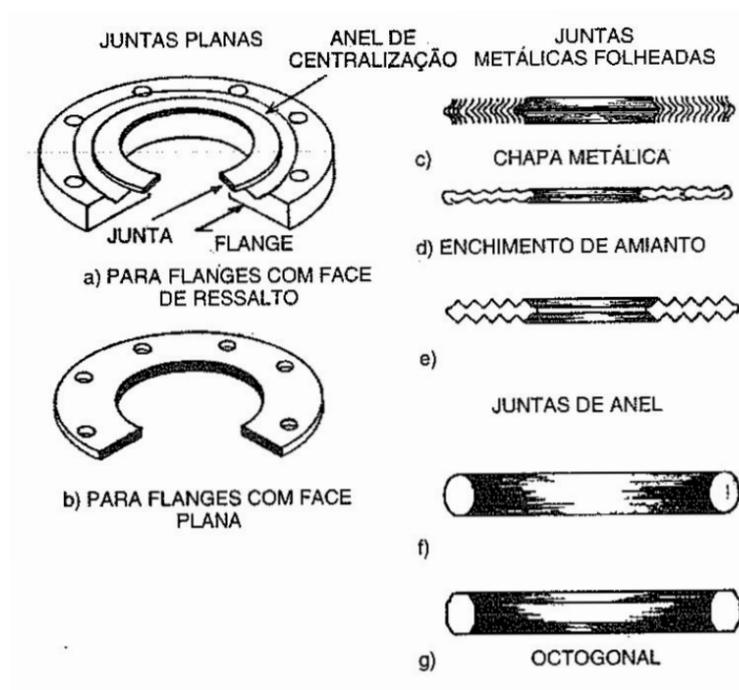


Figura 14. Exemplos de tipos juntas metálicas, onde a) Flange de face ressaltada; b) Flange de face plana; c) Junta semi metálica em espiral; d) Junta metálica folheada; e) Junta metálica maciça; d) e g) Juntas metálicas de anel. Fonte: (TELLES 2001).

### 2.6.3. Forças na União Flangeada

Nas ligações flangeadas as juntas têm o papel crucial de manter uma correta vedação, visto que torna-se inviável tecnicamente e economicamente produzir flanges com superfícies perfeitamente planas e lisas mantendo contato físico permanentemente. Esta dificuldade se dá pelas dimensões das tubulações ou vasos onde a flange deve ser aplicada, manter manuseio ou montagem que não danifique a superfície perfeitamente lisa e plana e a corrosão e erosão que são efeitos naturais do tempo de uso, Desta forma, as juntas atuam como os melhores

elementos de vedação ao serem apertadas entre as superfícies das flanges, preenchendo as imperfeições e promovendo então a vedação (VEIGA 2014).

Para se alcançar a vedação satisfatória, como explica Veiga (2014) é necessário entender as forças que agem nesta estrutura. A Força de Esmagamento inicial deve se adequar a melhor forma de fazer a junta esmagada preencher os espaços vazios das flanges, sem destruir a junta e comprometer a sua função. A Força de Vedação age como uma pressão residual sob a junta, de modo que se mantenha em contato com as superfícies dos flanges sem permitir vazamentos. Em um projeto de juntas deve-se considerar dois fatores importantes que se correlacionam com a atuação de forças na ligação flangeada, são a Seleção do material, pois o material deve ser capaz de resistir às pressões as quais a junta será submetida e ao fluido vedado, o outro fator é o Acabamento superficial, para cada tipo de junta e material existe um acabamento recomendado para superfícies de vedação, algo crucial para evitar vazamentos (VEIGA 2014).

Veiga (2014) ainda descreve quatro principais forças que agem na união flangeada, sendo estas listadas a seguir e também demonstradas no esquema da Figura 15:

- **Força radial:** Originada pela pressão interna e tende a expulsar a junta.
- **Força de separação:** Também originada pela pressão interna e tende a separar os flanges.
- **Força de aperto dos parafusos:** Carga total exercida pelo aperto dos estojos.
- **Força de selagem da junta de vedação:** Força que comprime os flanges contra a junta.

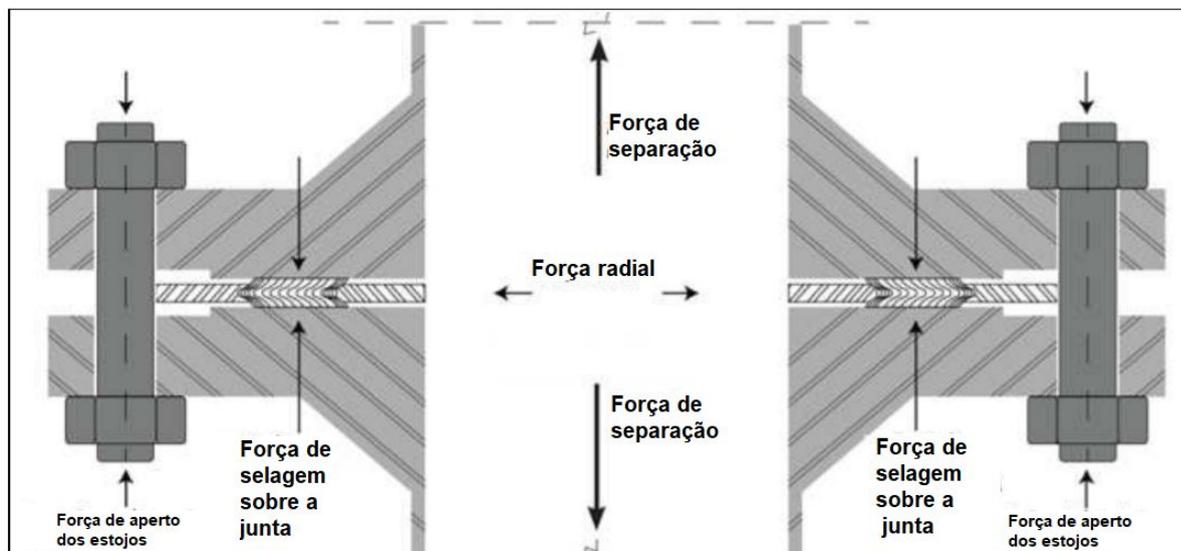


Figura 15. Esquema demonstrando as principais forças atuantes na união flangeada.

Fonte: Adaptado (VEIGA 2014).

Inicialmente a força de vedação é igual a força dos estojos, após a pressurização do sistema flangeado passa a ser igual a força dos estojos menos a força de separação. Ao ser aplicada inicialmente a junta, a força de aperto dos estojos deve então compensar a força de separação que é gerada pela pressão interna, ser suficiente para manter uma pressão residual sobre a junta, de forma que seja evitado algum vazamento e deve compensar o relaxamento da ligação flangeada que deverá ocorrer durante o tempo de aplicação do sistema flangeado (VEIGA 2014).

Esta força de aperto inicial é definida por meio do torque de montagem, com uma ferramenta chamada de torquímetro, podendo ser manual, pneumática ou hidráulica conforme explica Pereira (2020). Este aperto também pode ser alcançado através de ferramentas hidráulicas chamadas de tensionadores. O método mais utilizado é o torqueamento, usando-se mais o tensionador para as ligações flangeadas mais críticas (altas pressões e temperaturas) e de maior responsabilidade (flanges de grandes dimensões, fluidos tóxicos, água, condensado e vapor d'água de altíssima pressão, etc.). Este aperto promove a força de tração no estojos e a conseqüente compressão sobre a junta, para assim

impedir o vazamento com a abertura dos flanges, compensando a perda por atrito entre as roscas, a perda por atrito entre a face da porca e do flange e a atuação da força de pressão e dos esforços externos (PEREIRA 2020).

#### **2.6.4. Critérios de um Projeto de Juntas**

Em um processo de seleção de tipo de junta de vedação ou de desenvolvimento de uma nova junta deve-se considerar alguns critérios importantes. Alguns destes critérios já foram abordados, como a vedação a as forças atuantes nas flanges onde a junta será aplicada. Deve-se atentar a estes fatores tanto no desenvolvimento de design de junta como na seleção de materiais ou desenvolvimento de novos materiais para juntas. Os principais critérios segundo Veiga (2014) são o Vazamento, Pressão e Temperatura, Adequação aos Flanges e Compatibilidades químicas. Antaki (2005) Ainda lista diversos fatores que devem ser considerados na seleção de juntas, como: Limitações especificadas no catálogo do fabricante da junta, Permeabilidade da junta ao fluido, Compatibilidade da junta com o material da flange, Disponibilidade e custo das juntas, Resistência à fluência ou fluidez (ASTM F 38), Capacidade de recuperar (compressão e recuperação) (ASTM F 36A), Selabilidade (ASTM F 37), Compatibilidade da junta com o ambiente, Resistência (ASTM F 152) e Suavidade ou rugosidade do acabamento da face do flange. Alguns destes critérios são analisados com maior atenção:

##### **2.6.4.1. Vazamento**

Uma boa vedação parte do princípio de que não haverá Vazamentos. Se uma junta está ou não vazando dependerá do método ou critério de avaliação usado. No estabelecimento de um critério para avaliar o vazamento de uma junta deve-se considerar, como afirma Veiga (2014), o fluido a ser vedado, o impacto ambiental

gerado pelo vazamento, o perigo de incêndios e explosões, limites de emissões fugitivas, dentre outros fatores de risco.

Deve-se atentar a quatro condições básicas conforme Veiga (2014) indica:

- Pressão de operação;
- Força dos parafusos;
- Resistência ao ataque químico do fluido;
- Temperatura de operação.

#### **2.6.4.2. Condições de Pressão e Temperatura**

Um bom ponto de partida na seleção do material de uma junta é a análise da temperatura e da pressão de serviço. Assim, recomenda-se comparar os valores de projeto com os dados de catálogos informados (VEIGA 2014). Neste não apenas análises quanto a resistência do material são necessárias, como também análises referentes ao comportamento térmico do material, como o Relaxamento creep, chamado também de Relaxamento de tensão ou fluência que pode ser definido, como explica Canevarolo (2010), como a deformação plástica que ocorre em um material, sob tensão constante ou quase constante, em função do tempo, e no caso da avaliação ao comportamento térmico, uma temperatura pode ser aplicada junta a tensão e ao tempo.

Essa avaliação da fluência relacionada à temperatura de trabalho é dada pelo fator PQR (Fator adimensional que quantifica o relaxamento da junta após um período em operação à temperatura de serviço), sendo o PQR a razão entre as cargas residuais e as originais de um teste de relaxamento com o deslocamento de uma prensa de compressão controlada com uma rigidez conhecida conforme é definido pela norma BS EN 13555 (2014).

Nesta avaliação precisa-se considerar possíveis variações bruscas de temperatura e pressão, de forma que a junta selecionada seja resistente. Uma boa forma de verificar estas características pode ser através dos gráficos de pressão x temperatura de juntas, geralmente disponibilizados por fornecedores. Um exemplo deste gráfico pode ser visualizado na Figura 16, onde estas condições de operação podem ser avaliadas pelas áreas do gráfico.

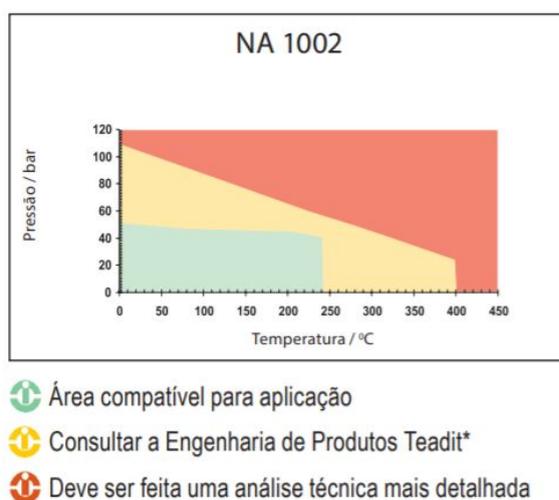


Figura 16. Gráfico pressão x temperatura para juntas de Papelão hidráulico de Fibra Aramida e NBR. Fonte: (TEADIT).

### 2.6.4.3. Adequações aos Flanges

Embora as Juntas não metálicas sejam muito utilizadas por serem muito econômicas e possuírem vasta área de aplicação, devem ser consideradas restrições importantes no emprego destes materiais, que não são usados em aplicações muito severas. O primeiro fator a ser observado é a presença de ciclos térmicos na tubulação. Variações na temperatura causam dilatações térmicas em todos os elementos da união (flange, junta, parafusos, porcas, etc.), e alguns materiais não apresentam boa resistência a este tipo de condição. Em linhas que sofrem manutenção frequente, ou seja, a temperatura e a pressão às quais a junta

está sujeita sofrerem variações significativas, deve-se selecionar outros materiais para as juntas. No caso de linhas que passam por uma parada para manutenção anual, deve-se selecionar cuidadosamente um material que apresente resistência aceitável às variações sem comprometer o funcionamento adequado do conjunto. O segundo fator que deve ser verificado é o tipo de flange em questão. A aplicação de juntas não metálicas só é possível em flanges cuja face de vedação é do tipo plana (FF) ou ressaltada (RF) e ambas devem ser, obrigatoriamente, ranhuradas (RODRIGUES 2016).

Outro fator importante quando se avalia a adequação ao flange é o acabamento superficial. O acabamento superficial possui grande influência na selabilidade, podendo variar de acordo com a o tipo de flange em que a junta será utilizada. As juntas não metálicas necessitam ser ranhuradas para que sejam “mordidas” pela superfície de vedação, de forma que evite expulsão da junta através da força radial. As juntas metálicas têm um acabamento liso, devido a elevada força que precisa exercer para que escoe sobre as irregularidades do flange e assim diminuir a possibilidade de vazamento, já as juntas semi metálicas precisam ser um pouco rugosas. É importante que o material do flange tenha dureza menor que o da junta para que o acabamento superficial do flange seja mantido (DANTAS & SILVA & SANTANA & ALVES & SANTOS 2019).

As dimensões da junta precisam ser também adequada aos flanges. O material de juntas não metálicas geralmente é encontrado em formato de folhas ou de placas retangulares com grandes dimensões, podendo serem cortadas ou estampadas nas dimensões desejadas de acordo com as flanges. O diâmetro interno da junta deve ser ligeiramente maior que o diâmetro da tubulação ou vaso, de forma que não exista risco de obstrução do fluxo quando os parafusos forem apertados e a junta for comprimida. No entanto, se o diâmetro interno da junta for muito maior que o da tubulação, o fluido pode corroer a parte exposta do flange (RODRIGUES 2016). Para flanges de face ressaltada (RF), é necessário que a junta seja dimensionada corretamente de acordo com as respectivas dimensões

das flanges de aplicação, pois seu diâmetro externo tangencia os parafusos e ajuda a centralizar a junta no momento da instalação. Juntas instaladas descentralizadas estão sujeitas a esforços irregulares e, conseqüentemente, pode gerar grandes riscos de falha (RODRIGUES 2016). Como indicado por Veiga (2014), para flanges com diâmetro de até 10”(25,4cm) devem ser usadas juntas com 1/16”(1,6cm) de espessura e para flanges com diâmetros superiores a 10”(25,4cm) deve-se utilizar juntas com 1/8”(3,2mm) de espessura.

#### **2.6.4.4. Compatibilidade Química**

Quando se projeta uma junta de vedação é necessário considerar os fluidos que poderam passar na tubulação em que a junta seja empregada, pois esta precisa ser compatível com o fluido a ser vedado. As aplicações adequadas de cada produto deve ser disponibilizada por fabricantes e considera na aplicação da junta. A seleção incorreta do material pode causar a corrosão do material da junta, comprometendo gravemente a vedação, assim como no caso de desenvolvimento de juntas é preciso ser avaliado as condições de compatibilidade em que o material possa ser aplicado. No caso de fluidos como água para consumo humano, alimentos e fármacos, deve-se ficar atento à deterioração do material da junta por causa da possibilidade de contaminação do fluido (RODRIGUES 2016).

A compatibilidade é determinada se as propriedades físicas e químicas da junta são afetadas adversamente pela exposição ao fluido. Tais efeitos adversos são mudança de cor, encolhimento ou perda de peso e inchaço ou amolecimento dos materiais. Esses efeitos são resultados de ataque químico direto, especificamente oxidação e corrosão. O ataque químico direto é um assunto muito complexo e pode ser influenciado por muitas variáveis diferentes, como temperatura, concentração e duração da exposição. Como regra, a seleção de uma junta torna-se mais crítica com o aumento da temperatura, uma vez que a

taxa de ataques químicos geralmente aumenta com a temperatura (FSA & ESA 2017).

#### **2.6.4.5. Propriedades Mecânicas**

Considerando todas as forças que atuam na união flangeada, como evidenciado, se faz necessário a avaliação do material e tipo de junta submetido a estas forças. A junta precisa ter capacidade de compressão e recuperação mediante os esmagamentos que sofrerá aos apertos nos flanges e parafusos para prover uma correta vedação, assim como possuir resistência mecânica o suficiente para contrapor a pressão do fluido vedado e evitar falhas como vazamentos e explosões.

A norma ASTM F36 (2015) abrange a determinação da compressibilidade e recuperação de curto prazo à temperatura ambiente dos materiais de juntas. Não se destina a ser um teste de compressibilidade sob aplicação de tensão prolongada, geralmente referida como "fluência", ou de recuperação após essa aplicação de tensão prolongada, cujo inverso é geralmente referido como "conjunto de compressão". Além disso, não se destina a testes que não sejam a temperatura ambiente. Uma característica de resiliência (a quantidade recuperada expressa em porcentagem da espessura compactada) também pode ser calculada a partir dos dados desse teste (ASTM F36 2015). A compressibilidade indica o grau em que um material é comprimido ou deformado em espessura pela aplicação de uma carga específica. É importante determinar se um material pode comprimir o suficiente para compensar irregularidades ou fora de condições planas em uma flange. Recuperação pode ser definida como o grau de retorno em espessura após a remoção da carga compressiva, seu valor principalmente indica a resiliência de um material de junta (GORDON 1968).

Lee e Huang (2001) explicam que espera-se que uma junta, quando comprimida, esteja em conformidade com as irregularidades da superfície da flange e, portanto, recubra os caminhos de vazamento na interface entre uma junta

e o flange (vazamento tangencial). Normalmente, considera-se que uma junta com maior recuperação responda melhor com as reduções na carga dos parafusos, mantendo um bom contato com a superfície, evitando assim um aumento significativo do vazamento tangencial. Isto é particularmente melhor em materiais à base de borracha. No entanto, o fluido interno também pode permear através da junta, outro mecanismo importante de vazamento, e a descompressão de uma junta com alta recuperação pode abrir os caminhos de vazamento da junta e causar taxas de vazamento mais altas.

Já a norma ASTM F 152 (2017) abrange a análise de resistência a tensões em juntas não-metálicas, por meio da resistência à tração. A norma explica que a medição desta propriedade caracteriza várias classes e graus de materiais de um determinado tipo e fornece uma medição da qualidade da junta. A resistência a tração pode ser definida como a carga máxima que um material pode suportar sem apresentar fratura ao ser esticado. Gordon (1968) explica que este é um procedimento de teste físico amplamente utilizado para materiais de juntas, como a resistência à tração é uma medida da resistência de um material a ser tracionado, é frequentemente considerada uma resposta de sua resistência interna (pressão do fluido). Em alguns casos, acredita-se que esta propriedade esteja relacionada a certas características funcionais de uma junta, particularmente a resistência à extrusão ou ruptura.

Outra importante característica para se considerar em um projeto de junta é a Selabilidade do material. A selabilidade de materiais para juntas de vedação é abrangida pela norma ASTM F37(2006) que diz que seus métodos de teste são adequados para avaliar as características de vedação de um material de junta sob diferentes cargas de flange de compressão. A selabilidade pode ser definida como a capacidade de um material de vedação de impedir o fluxo de fluido através do corpo e/ou sobre as superfícies. Gordon (1986) explica que a Selabilidade é um termo usado para expressar as propriedades de vedação dos materiais de junta e que a medição dessa característica é de primordial importância na definição do

atributos do material para juntas de vedação. Como a função básica de uma junta é fornecer uma vedação entre duas superfícies correspondentes, qualquer procedimento de teste que ofereça maneiras de descrever o desempenho de um material sob estas condições específicas é digno de uma investigação cuidadosa.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Este trabalho foi realizado em parceria com Braskem, empresa brasileira do ramo petroquímico, produtora de resinas termoplásticas e fornecedora do PVC utilizado nesta pesquisa, a Nitriflex, empresa brasileira do ramo de borrachas nitrílicas e polímeros especiais, fornecedora da NBR utilizada nesta pesquisa e a Teadit, empresa multinacional do ramo de vedação industrial e parceira da Braskem, a qual realizou em parceria com o Centro Universitário SENAI CIMATEC alguns dos ensaios estudados neste trabalho.

Vale ser citado também, que este trabalho segue a continuidade de outro trabalho realizado com as mesmas empresas parceiras, sob o título de **AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS, MORFOLÓGICAS E DE DUREZA EM BLENDAS PVC/NBR APLICADO EM JUNTAS INDUSTRIAIS** de autoria de João Gutemberg Valentim Marçal e Michele Damiana Mota Martins como trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Centro Universitário SENAI CIMATEC como parte das exigências para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais, onde as mesmas formulações foram propostas para a avaliação de blendas PVC/NBR como juntas, mas focando suas análises na morfologia, características térmicas e dureza dessas blendas, conforme será devidamente referenciado neste trabalho. Em alguns pontos, este trabalho irá citar e correlacionar resultados e discussões apresentados por Marçal e Martins (2020) com a finalidade de promover a conclusão dos esforços realizados em ambos os trabalhos.

Os materiais utilizados em concordância com o trabalho anterior de Marçal e Martins (2020) e as novas metodologias empregadas neste trabalho são descritos nos tópicos seguintes.

### 3.1. Materiais

Foram propostas quatro formulações. Em todas as formulações foram variados apenas os teores de Carga mineral e NBR, parametrizando os teores dos outros componentes como fixos. Essa variação tem o objetivo de avaliar a influência de diferentes teores (pcr) desses componentes específicos (Carga mineral e NBR) nas propriedades mecânicas das composições formuladas. Os materiais utilizados estão listados e descritos abaixo:

- NORVIC® SP767RA: Segundo a ficha técnica da Braskem essa resina é um homopolímero de PVC que é obtido pelo processo de polimerização por suspensão, de elevada densidade volumétrica, capacidade de gelificação, estabilidade térmica e produtividade na extrusão de rígidos. De acordo também com a ficha técnica da Braskem, suas propriedades são as mostradas na Tabela 1;

Tabela 1: Características do NORVIC® SP767RA.

Características	Valores
<i>Valor K</i> <i>Parâmetro para caracterização do grau de polimerização de um polímero de cloreto de vinila de acordo com a NBR 13610 (1996)</i>	66,5 - 68,0
<i>Materiais voláteis</i>	<= 0,3%
<i>Granulometria &gt; 250 µm</i>	<= 3%
<i>Granulometria &gt; 63 µm</i>	>= 97%
<i>Densidade volumétrica</i>	0,56 ± 0,02 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: (Braskem 2019).

- NAFTOSAFE CZ-6530: Estabilizante em base de cálcio e zinco para composto de PVC rígido, com nível de 1,6 a 2,6 % de Ca e 1,5 a 2,5% de Zn e ponto de fluidez de 87 a 97 °C;
- Drapex® 6.8: Material utilizado como plastificante em formulações de vinílicos;
- A-C® 316A: Homopolímero de polietileno oxidado (HDOxPEs) empregado nestas formulações como lubrificante;
- Irganox® 1076: Antioxidante fenólico que protege os substratos contra a degradação termo-oxidativa;
- Micron 1/9CD: Calcita natural moída muito fina sendo indicada para aplicação em compostos de PVC;
- MONARCH® 700: Negro de fumo utilizado como pigmento;
- Nitriflex NP-3183 NV: Copolímero de butadieno-acrilonitrila em pó, pré-reticulado. Conforme a ficha técnica da Nitriflex, esse material é aplicado como um modificador para PVC com o intuito de promover melhores transparência, resistência à degradação sob cisalhamento, melhor processamento, estabilidade dimensional e alto fluxo. De acordo também com a ficha técnica da Nitriflex, suas propriedades são as mostradas na Tabela 2;

Tabela 2: Características do Nitriflex NP-3183 NV.

<b>Características</b>	<b>Valores</b>
<i>Teor de Agente de Participação PVC</i>	10,0 – 14,0 %
<i>Granulometria(Passa através de peneira com abertura de 1 mm)</i>	99,0 – 100,0 %
<i>Teor de umidade</i>	0,0 – 0,7 %
<i>Acrilonitrila Combinada (Polímero Base)</i>	30,5 – 33,5 %
<i>Viscosidade Mooney (Polímero Base)</i>	30 – 45 (MML1+4 @ 100°C)

Fonte: (Nitriflex 2016).

Os aditivos a serem incorporados no PVC são quantificados em partes por cem partes de resina (pcr). Esse fator representa a quantidade em massa do componente da formulação de acordo com 100 unidade de massa da resina (RODOLFO 2006). Desta forma, a Tabela 3 mostra o teor dos componentes em pcr.

Tabela 3: Formulações propostas.

Componentes e funções	Teor (pcr)				
	PVC40C30NBR	PVC10C30NBR	PVC40C10NBR	PVC10C10NBR	
<b>NORVIC</b> ® <b>SP767RA</b>	Resina	100	100	100	100
<b>NAFTOS</b> <b>AFE</b> <b>CZ-6530</b>	Estabilizante térmico	5	5	5	5
<b>Drapex</b> ® <b>6.8</b>	Plastificante	10	10	10	10
<b>A-C</b> ® <b>316A</b>	Lubrificante	0,15	0,15	0,15	0,15
<b>Irganox</b> ® <b>1076</b>	Antioxidante	0,5	0,5	0,5	0,5
<b>Micron</b> <b>1/9CD</b>	Carga mineral	40	10	40	10
<b>MONARC</b> <b>H</b> ® <b>700</b>	Pigmento	0,5	0,5	0,5	0,5
<b>Nitriflex</b> <b>NP-3183</b> <b>NV</b>	NBR	30	30	10	10

Fonte: Própria.

### 3.1.1. Planejamento experimental (DOE)

Neste trabalho a avaliação das composições propostas e das propriedades será conduzida pela metodologia de Planejamento Experimental ou *Design of Experiments* (DOE). Esta decisão foi tomada para que os resultados pudessem ter maior significância estatística a medida que o cumprimento objetivo do projeto

demanda não só a avaliação de qual formulação deve ter tido melhores resultados, mas também como indicar um direcionamento caso precise de melhorias. A estatística existe para se obter respostas com precisão e embasamento, com otimização tanto na execução de testes como na otimização do tempo, visto que este projeto possui como suas principais restrições tempo de execução curto. Como Neto et al. (2001) afirmam, ao utilizar planejamentos experimentais centrados em princípios estatísticos, os pesquisadores podem extrair do sistema em estudo o máximo de informação útil, fazendo um número mínimo de experimentos. Montgomery (2017) também explica que a utilização de métodos de planejamento e design experimental possui fundamental importância nas atividades de desenvolvimento na engenharia, utilizando como forma de se avaliar alternativas para materiais, comparações de configurações de produtos, formulações de novos produtos e seleção de parâmetros. Ainda cita os resultados da utilização de planejamento experimental:

- Melhor rendimento de processos;
- Variabilidade reduzida e conformidade mais próxima aos requisitos nominais;
- Tempo de desenvolvimento reduzido;
- Custos gerais reduzidos.

Neste trabalho serão analisados experimentos fatoriais ortogonais de modelos  $2^2$ (dois fatores variando dois níveis) e  $2^3$ (três fatores variando dois níveis), os quais os fatores e as variáveis de resposta estão descritos na Tabela 4, ressaltando que os três planejamentos não são referentes à diferentes desenvolvimentos de formulações, mas sim três métodos ou “pontos de vista” de analisar os resultados das mesmas formulações propostas. Foram escolhidos os três métodos para que pudesse ser avaliada a significância em diferentes cenários, evitando que o estudo se prenda a um único fatorial que não apresente significância estatística após análise, por exemplo.

Para estudar o efeito de qualquer fator sobre uma dada resposta, precisamos fazê-lo variar de nível e observar os resultados que essa variação produz sobre a resposta, para isso, precisamos ter o fator em pelo menos dois níveis diferentes

(NETO et al. 2001). A partir destes experimentos fatoriais serão estudados a ANOVA(análise de variância) das respostas, os efeitos dos fatores e suas respectivas interações. Esta análise será executada a partir dos dados obtidos pelos ensaios de Densidade, Compressão e recuperação, Resistência à Tração, Relaxamento Creep(PQR) e Selabilidade, com gráficos e dados estatísticos obtidos através do *Software* Minitab versão 18 (ano 2018).

Tabela 4: Planejamentos experimentais propostos.

Modelo de análise fatorial	Fatores controlados	Variáveis de resposta
2 <sup>2</sup> (placas de 1,6mm)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Teor(pcr) de NBR;</li> <li>● Teor(pcr) de Carga mineral.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Densidade(g/cm<sup>3</sup>);</li> <li>● Compressão(%);</li> <li>● Recuperação(%);</li> <li>● Resistência(kgf/cm<sup>2</sup>);</li> <li>● PQR(%);</li> <li>● Vazamento(mL/h).</li> </ul>
2 <sup>2</sup> (placas de 3,2mm)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Teor(pcr) de NBR;</li> <li>● Teor(pcr) de Carga mineral.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Compressão(%);</li> <li>● Recuperação(%);</li> <li>● Resistência(kgf/cm<sup>2</sup>);</li> <li>● PQR(%);</li> <li>● Vazamento(mL/h).</li> </ul>
2 <sup>3</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Teor(pcr) de NBR;</li> <li>● Teor(pcr) de Carga mineral;</li> <li>● Espessura das placas (mm).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Compressão(%);</li> <li>● Recuperação(%);</li> <li>● Resistência(kgf/cm<sup>2</sup>);</li> <li>● PQR(%);</li> <li>● Vazamento(mL/h).</li> </ul>

Fonte: Própria.

### 3.2. Desenvolvimento das formulações

Estas formulações foram desenvolvidas pela unidade de Pesquisa e Desenvolvimento da Braskem do Rio Grande do Sul, sendo prensadas para confecção de placas de acordo com as seguintes dimensões: 250 mm de comprimento, 250 mm de largura e 1,6 mm e 3,2 mm de espessura, obtendo três placas (duas com espessura de 1,6mm e uma com espessura de 3,2 mm) para cada composição.

Antes do início do processo de fabricação, os aditivos foram pesados de acordo com as formulações estabelecidas, procedendo por uma mistura manual dos aditivos sólidos em uma embalagem de filme plástico a fim de promover

homogeneidade. Os compostos sólidos já misturados foram transferidos para um béquer. Assim foi adicionado o aditivo líquido (Plastificante Drapex 6.8), e em seguida, utilizando uma espátula, procedeu-se novamente com a mistura manual para a sua adequada absorção.

Em seguida, esse composto sólido foi submetido a um processo de calandragem para incorporação e fusão dos aditivos, utilizando uma calandra de 2 rolos com os parâmetros de processamento descritos na Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros de processamento para o composto.

<b>Parâmetros de processamento da calandra</b>	
Temperatura	185°C
Rotação	25rpm
Tempo	3 minutos

Fonte: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Braskem (2019).

Essa massa fundida foi então transferida para um molde do vazado, usando um espaçador adequado com a função de delimitar a espessura desejada. O material então foi submetido a um processo de moldagem por compressão, a uma temperatura de cerca de 175 °C, utilizando 2 ciclos. Um de baixa pressão (12 T) por 1 minuto e outro de alta pressão (35 T) por 3 minutos, seguido imediatamente para um resfriamento a uma taxa de 15 °C/min, sendo a placa então desmoldada ao final do processo quando atingida uma temperatura menor que 40° C. Realizou-se a etapa descrita acima separadamente para cada placa prensada. Um fluxograma de todo o processo pode ser visualizado na Figura 17.

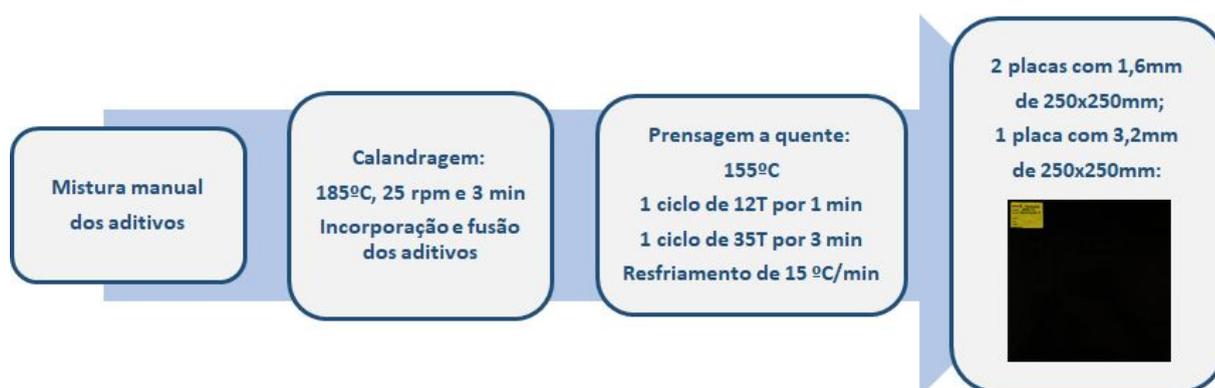


Figura 17. Fluxograma do desenvolvimento das formulações.

Fonte: Própria.

### 3.3. Caracterizações Mecânicas

Este trabalho teve como foco o estudo das propriedades mecânicas, considerando também o Relaxamento *creep*, que possuem relação direta com o desempenho do material na aplicação proposta, como juntas de vedação. Dentre as análises contempladas durante este trabalho, alguma destas foram realizadas com o apoio e os equipamentos da equipe da Teadit, parceira da Braskem neste Projeto. Estas análises são de acordo com as respectivas normas:

- Compressão e Recuperação (Norma ASTM F36 – 2015);
- Resistência à Tração (Norma ASTM F152 – 2017);
- *Creep* (Norma DIN EN 13555 – PQR – 2014);
- Selabilidade com Nitrogênio (ASTM F37B – 2019).

Os resultados dos testes realizados pela Teadit foram então enviados para a equipe do Projeto e submetidos análises e estudo do planejamento experimental, juntamente com o ensaio de Densidade realizado no SENAI CIMATEC. As considerações e procedimentos de cada ensaio são descritos em seus respectivos tópicos. Como não há normatização que define requisitos para aplicação de um material não-metálico como juntas de vedação, a avaliação das propriedades estudadas se deu por meio da comparação direta com as mesmas propriedades de desempenho de um material da mesma classe, neste caso, o Papelão Hidráulico de Fibra Aramida e NBR da Teadit. A ficha técnica com todas as características comparadas, dentre outras propriedades, deste material encontram-se no ANEXO II. Os resultados obtidos foram então organizados em um Datasheet contendo as informações de propriedades compilados pelos trabalhos que avaliaram as blendas de PVC/NBR, este se encontra no ANEXO I deste trabalho.

#### 3.3.1. Densidade

Seguiu-se as determinações da norma ISO 1183-1 para se obter as densidades das amostras, pelo método A (método por imersão), após um período

de 24h de condicionamento à temperatura de  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ . O ensaio foi realizado em um equipamento medidor de densidade para sólidos e líquidos, da Indústria e Comércio Eletroeletrônica Gehaka Ltda., de modelo DSL910 e o líquido de análise utilizado foi álcool etílico.

Para o ensaio de Densidade não considerou-se as diferenças de espessura entre o material, feita apenas com uma espessura, logo o modelo fatorial analisado por DOE foi de  $2^2$ , usando como base o planejamento experimental com as placas de 1,6mm. Assim, o ensaio foi realizado em triplicata para cada formulação.

### **3.3.2. Compressão e Recuperação**

Para o ensaio de compressão e recuperação foi usada a norma ASTM F36, que é a redução de espessura do material, quando submetido a uma carga expressa como um porcentagem da espessura original. Recuperação é a retomada da espessura quando a carga sobre o material é retirada, expressa porcentagem da espessura comprimida. Compressibilidade indica a capacidade do material de se acomodar as imperfeições dos flanges. Quanto maior a compressibilidade, mais facilmente o material preenche as regularidades. A recuperação indica a capacidade do material em absorver os efeitos das variações de pressão e temperatura.

O equipamento utilizado para a realização do teste consiste em uma superfície lisa e endurecida com diâmetro mínimo de 31,7 mm, um penetrador de diâmetro 6,4 mm (especificado pela norma de acordo com o material a ser testado), um relógio indicador de espessura do material no ponto de compressão e os pesos que em conjunto formam a pré-carga e a carga total especificadas pela norma de acordo com o material testado. O teste é realizado com o auxílio de um cronômetro para que o operador imprima as cargas de acordo com o seguinte procedimento: Centralizar a amostra na superfície de teste, aplicar a pré-carga e manter por um período de 15 segundos, anotando a espessura da amostra ao final de 15 segundos (P). Imediatamente após os 15 segundos de pré-carga, aplicar de maneira gradual e uniforme a carga total de modo que seja atingida em um

intervalo de 10 segundos. Manter a carga total por um período de 60 segundos e então anotar o valor de espessura ao final deste intervalo (M). Imediatamente após este intervalo, retirar a carga total e após 60 segundos, anotar a espessura da amostra que está sobre a pré-carga (R). Os testes são realizados em triplicata e o valor de compressão e recuperação é dado em porcentagem de acordo com os seguintes cálculos:

$$\text{Compressão, \%} = \frac{(P-M)}{P} \times 100$$

$$\text{Recuperação, \%} = \frac{(R-M)}{(P - M)} \times 100$$

### 3.3.3. Resistência à tração

O procedimento do teste de Resistência à Tração de acordo com a norma ASTM F152, onde é destinado a avaliação de alguns materiais de vedação não metálicos à temperatura ambiente. Para a realização deste teste, é necessário cortar a amostra de acordo com o especificado para cada material, fazendo referência à norma ASTM D412, sendo necessário o equipamento de corte com o molde de modo que a amostra apresente extremidades com acabamento uniforme para que não seja criada uma zona de ruptura. O teste é feito com um equipamento com garras que prendem as extremidades da amostra e as separa a velocidade constante de 300 mm/min. É feita a medição da força aplicada e do momento da ruptura, de modo que é gerado um gráfico de Força x Deslocamento, fornecendo assim a força máxima aplicada ao material e o limite de resistência, que é a força máxima dividida pela área da seção transversal original da amostra testada.

A fim de obter maiores informações sobre o material testado, as amostras foram cortadas em dois sentidos diferentes: Paralela à laminação e Transversal à laminação. Devido a quantidade limitada de material para teste, na direção Paralela a laminação apenas foram testadas placas de 1,6mm para cada formulação desenvolvida.

### 3.3.4. Relaxamento *Creep* (PQR)

Este ensaio é conforme a norma DIN EN 13555 e analisa o comportamento de escoamento do material da junta quando submetido a um aperto seguido de aquecimento até a temperatura de trabalho. Para a realização do teste, é utilizado um testador que suporta o flange com ranhura entre  $3,2 \mu\text{m} < \text{Ra} < 6,3 \mu\text{m}$ , sendo todo o sistema de aquecimento e aperto conectado a um software que recolhe os dados em tempo real.

Neste teste, determina-se o parâmetro PQR (Fator adimensional que quantifica o relaxamento da junta após um período de 4 horas em operação à temperatura de serviço). Para se determinar o PQR, aplica-se um aperto inicial de maneira gradual e constante, mantendo-se o aperto por 5 minutos para o assentamento da junta. Em seguida, eleva-se a temperatura até o valor de trabalho. O valor adotado neste trabalho foi o de  $70^{\circ}\text{C}$ , por se tratar de uma temperatura superior a temperatura convencional das tubulações onde as formulações de PVC/NBR precisariam trabalhar, que é de  $60^{\circ}\text{C}$ . São esperadas as 4h e ao final do teste o aperto residual é registrado, sendo o valor de PQR dado pela seguinte equação:

$$\text{PQR, \%} = \frac{(\text{Aperto Remanescente, MPa})}{(\text{Aperto inicial, MPa})} \times 100$$

### 3.3.5. Selabilidade com Nitrogênio

Para o ensaio de selabilidade com nitrogênio foi utilizado a norma ASTM F37, método B, o que diz respeito ao vazamento de gás. O ensaio tem a função de medir a capacidade de vedação de uma junta, por exemplo, em condições de vazamento com fluidos decorrente de uma carga inicial sob compressão, quanto maior esta carga melhor a selabilidade (VEIGA 2008). Para a realização do ensaio utilizou-se uma prensa hidráulica de 50 ton, flanges com acabamento entre  $0,41$  e  $0,82 \mu\text{m}$ ,

aparato para determinação do vazamento, manômetro, uma célula de carga e duas amostras circulares com 32mm de diâmetro interno e 44mm de diâmetro externo. Na selabilidade houve a aplicação de uma carga inicial sob compressão de 3000 psi, em seguida, o fluido foi direcionado para o centro da amostra com pressão de 30 psi, enquanto o vazamento foi identificado por um manômetro com água localizado no equipamento. Os resultados desses vazamentos foram expressos em mililitros por hora (mL/h) e foram feitos três ensaios por amostra.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As placas de 1,6mm e 3,2mm após fabricação passaram pelo processo de estampagem para se obter os corpos de prova. A quantidade de material produzido não foi o suficiente para performar réplica iguais em todos os experimentos realizados, principalmente as amostras de 3,2 mm. Foi necessário definir as réplicas após realização dos testes a fim de manter a repetibilidade e acurácia dos ensaios. As amostras apresentaram espessura regular e apenas na Formulação 1(PVC40C30NBR) de 3,2mm houve alguma dificuldade de estampagem do material. Nas Figuras 18, 19 e 20 são mostradas as placas após a estampagem.

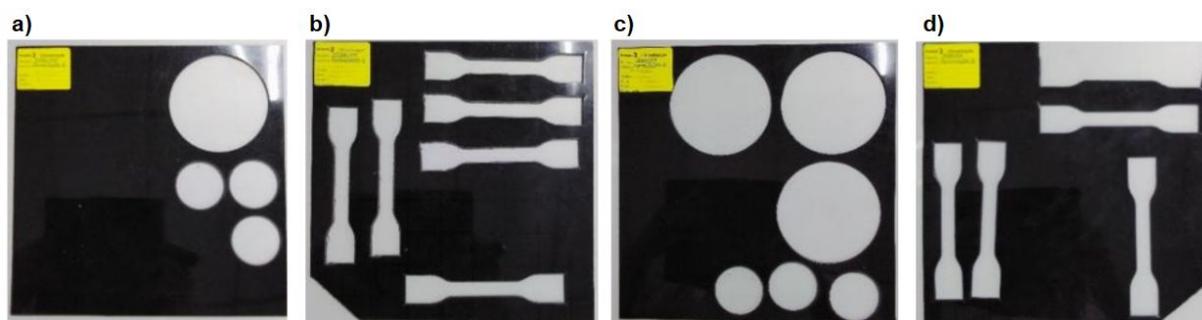


Figura 18. Placas de 1,6mm após estampagem, onde: a) e b)PVC40C30NBR , c) e d)PVC10C30NBR. Fonte: Teadit.

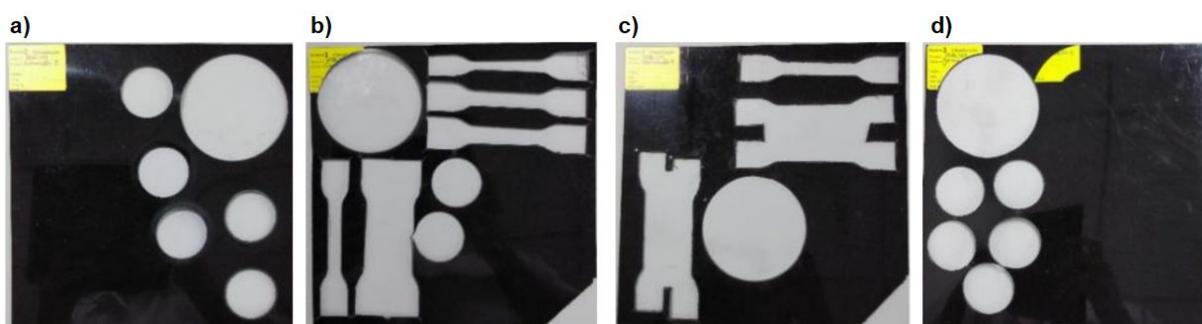


Figura 19. Placas de 1,6mm após estampagem, onde; a) e b):PVC40C10NBR , c) e d):PVC10C10NBR. Fonte: Teadit.

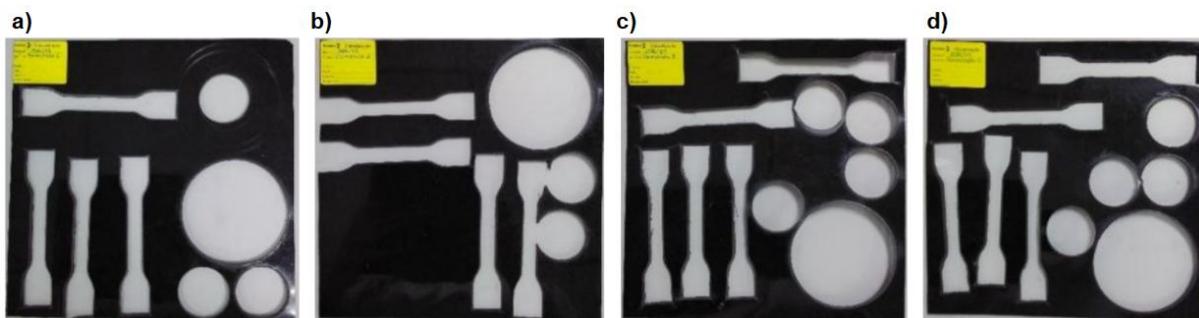


Figura 20. Placas de 3,2mm após estampagem, onde; a):PVC40C30NBR ,  
b):PVC10C30NBR , c):PVC40C10NBR e d):PVC10C10NBR.

Fonte: Teadit.

Após as análises de cada resultado dos ensaios realizados, encontram-se as análises por meio dos planejamentos fatoriais. Deve ser ressaltado que, exceto para os Gráficos de Interação, apenas foram considerados e analisados neste relatório os Gráficos de Pareto de Efeitos Padronizados e de Contorno para os ensaios os quais tiveram significância estatística na ANOVA (Análise de variância), pois somente mediante este requisito pode-se fazer afirmações acerca do comportamento estatísticos dos dados estudados.

#### 4.1. Densidade

A partir da Figura 21, é possível visualizar os resultados para a Densidade das formulações propostas. Pode-se notar um aumento de densidade médio de 4,8% com o decréscimo do teor de NBR nas formulações, tal evento também foi percebido por Passador et al. (2008) ao avaliarem a densidade de blendas PVC/NBR, onde afirmam que a redução da massa específica das blendas associadas ao elastômero é um evento esperado, pois há esta redução quando se incorpora uma fase com menor massa específica que a matriz, considerando a densidade específica da NBR é de  $0,98\text{g/cm}^3$  (Nitriflex 2019 - ANEXO II) a do PVC que é de cerca de  $1,4\text{g/cm}^3$  (TITOW 1986). Em ambos os casos, entretanto, verifica-se que a incorporação de teores crescentes de elastômero não altera de forma significativa a massa, como também foi notado no trabalho de Passador et al (2008).

É possível perceber também que o aumento mais significativo notado nas densidades se vê associado ao aumento do teor de carga mineral, visto que as formulações com maior teor de  $\text{CaCO}_3$  obtiveram aumento médio de 9,4% em comparação com as formulações de menor teor. Esse aumento é esperado pois, o  $\text{CaCO}_3$ , amplamente utilizado como carga de enchimento no PVC, é incorporado não apenas para economizar custos, mas também porque altera algumas propriedades, como o aumento da densidade específica como afirmam Titow (1986) e Rabello (2000), ao se adicionar uma carga mineral, de maior densidade ( $2,71 \text{ g/cm}^3$ ) em uma matriz polimérica.

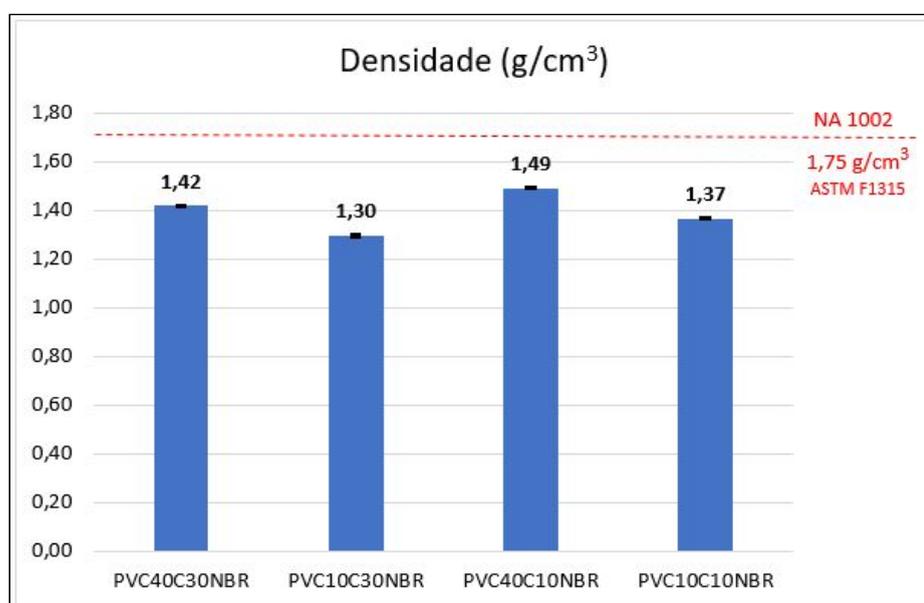


Figura 21. Gráfico dos resultados para Densidade das formulações propostas.

Fonte: Própria.

A Tabela 6 compara os resultados obtidos para a densidade neste trabalho com os obtidos por Dantas & Silva & Santana & Alves & Santos (2019). As composições de PVC estudadas por Dantas et al (2019) apresentaram densidades maiores no geral, em comparação as blendas PVC/NBR estudadas neste trabalho, isso deve principalmente a presença da NBR, como discutido, que mesmo com teores de 10pcr foi suficiente para reduzir o valor desta propriedade, a medida que

as composições de PVC de Dantas et al. (2019) possuem também maiores teores de  $\text{CaCO}_3$ .

Tabela 6: Comparação entre as Densidades das Blendas PVC/NBR com as composições de PVC para juntas estudadas por Dantas et al. (2019).

Densidade( $\text{g/cm}^3$ )		Densidade( $\text{g/cm}^3$ )(DANTAS et al 2019)	
<b>PVC40C30NBR</b>	1,42	<b>PVCC50P20</b>	1,49
<b>PVC10C30NBR</b>	1,30	<b>PVCC60P20</b>	1,60
<b>PVC40C10NBR</b>	1,49	<b>PVCC50P10</b>	1,56
<b>PVC10C10NBR</b>	1,37	-	-

Fonte: Própria; (DANTAS et al. 2019).

Quanto a análise estatística dos resultados para Densidade, o gráfico de interação e efeitos mostrado na Figura 22 evidencia o discutido a partir do gráfico da Figura 19, deixando claro que a Carga mineral foi o fator de maior efeito na diferença de resultados da Densidade, além de mostrar que não ocorreu interação entre os fatores nesta propriedade. A Tabela 7 apresenta a ANOVA desde ensaio, mostrando que houve significância para haver interpretação, conforme o Valor-P deu-se menor que 0,05, desta forma, pode-se seguir para a análise dos gráficos de Pareto e Contorno. O Gráfico de Pareto mostrado na Figura 23, mostra com significância de 95% que realmente a Carga mineral foi o fator preponderante nos resultados desta propriedade (Não obteve-se significância para afirmar se houve ou não mais ou menos influência do fator NBR), sendo assim, pelo Gráfico de Contorno para a Densidade mostrado na Figura 24, pode-se estabelecer um direcionamento para o controle desta propriedade, onde pode-se aumentar a Densidade com o aumento do teor de Carga mineral e redução do teor de NBR, e vice-versa.

Tabela 7: ANOVA com significância para a Densidade, pelo fatorial  $2^2$ .

Análise de Variância para Densidade – fatorial $2^2$					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
<b>Modelo</b>	2	0,020091	0,010046	265,60	0,043
<b>Linear</b>	2	0,020091	0,010046	265,60	0,043

<b>Carga mineral</b>	1	0,015240	0,015240	402,93	0,032
<b>NBR</b>	1	0,004851	0,004851	128,26	0,056
<b>Erro</b>	1	0,000038	0,000038		
<b>Total</b>	3	0,020129			

Fonte: Própria.

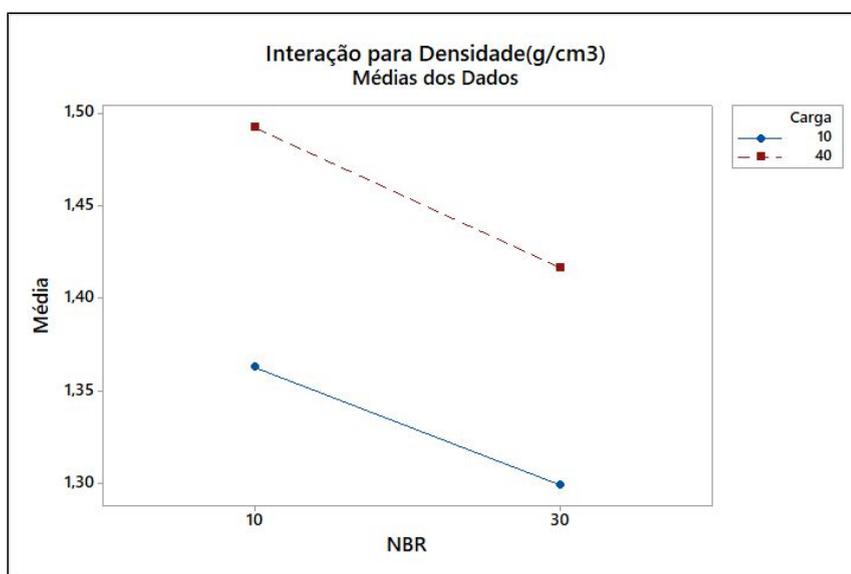


Figura 22. Gráfico de interações e efeitos para Densidade, por fatorial 2<sup>2</sup>.

Fonte: Própria.

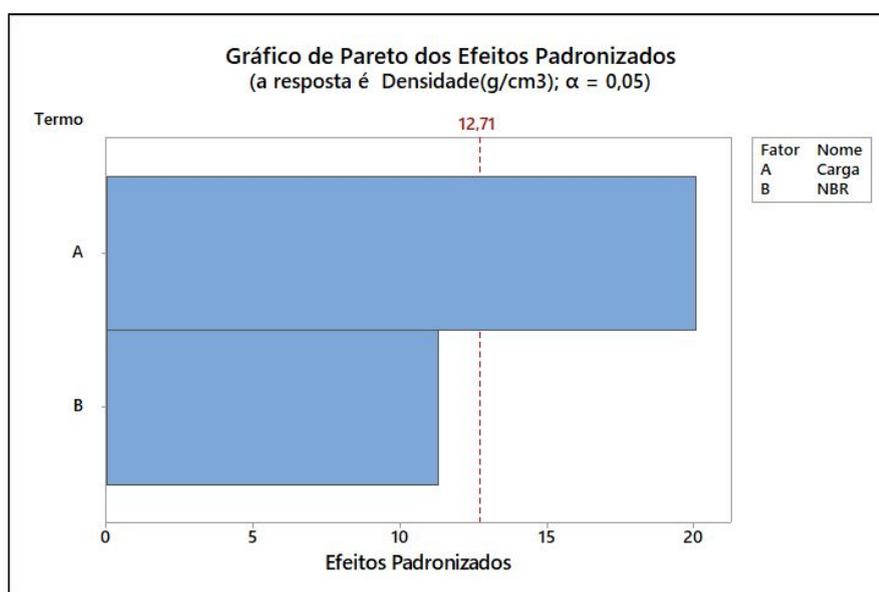


Figura 23. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para Densidade, por fatorial 2<sup>2</sup>.

Fonte: Própria.

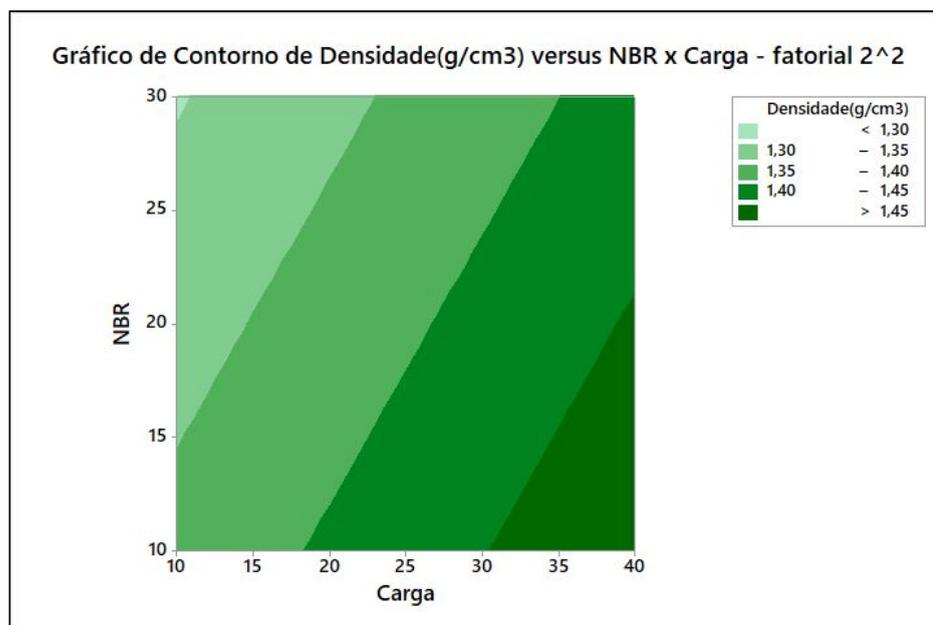


Figura 24. Gráfico de Contorno para Densidade, por fatorial 2<sup>2</sup>.

Fonte: Própria.

#### 4.2. Compressão e Recuperação

Para os testes das formulações PVC40C30NBR, PVC10C30NBR e PVC10C10NBR foram realizados 3 ensaios por amostra, exceto para a formulação PVC40C10NBR de 1,6 mm, onde foram realizados 6 ensaios, pois apresentou maior discrepância frente sua amostra equivalente de 3,2 mm.

As Figuras 25 e 26, mostram os gráficos com os resultados para a Compressão e a Recuperação das formulações. A partir da análise deste gráfico pode-se perceber que as formulações com maiores teores de NBR (PVC40C30NBR e PVC10C30NBR) obtiveram maior compressibilidade e conseqüentemente apresentaram também menores taxas de recuperação, embora os valores para a Recuperação tenham sido bastante próximos entre as formulações considerando os desvios padrões. Esse comportamento é esperado para formulações com menor dureza, sendo que Marçal e Martins (2020) identificaram que estas mesmas formulações foram as que apresentaram menor dureza (70,59 ShoreD e 67,94 ShoreD respectivamente) em comparação às outras formulações(79,19 ShoreD para a PVC40C10NBR e 77,16 ShoreD para a

PVC10C10NBR). Veiga (2014) explica que juntas mais rígidas requerem uma força de esmagamento maior do que as macias, apresentando então baixa compressibilidade. Outro fator que deve ter influenciado a diferença notada nestes resultados seria a Densidade, pois como Onat (2008) explica, materiais com menor densidade não são muito resistentes ao esmagamento e apresentam maiores taxas de compressibilidade, pelo ensaios de Densidade realizados neste trabalho pode-se notar a influência da adição da borracha nitrílica na redução desta propriedade nas mesmas formulações.

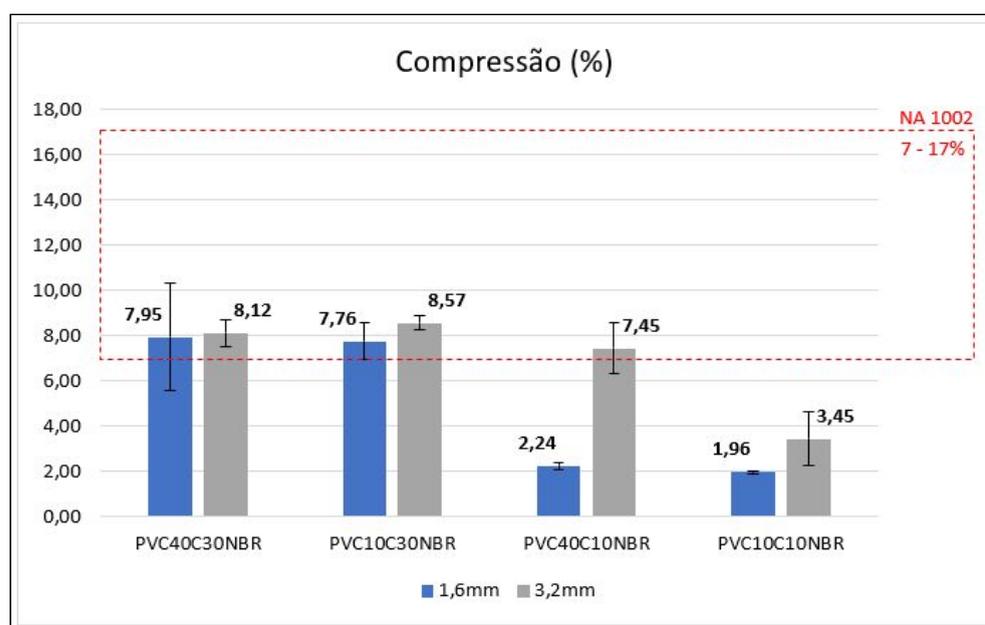


Figura 25. Gráfico dos resultados para Compressibilidade com referência da NA 1002.

Fonte: Própria.

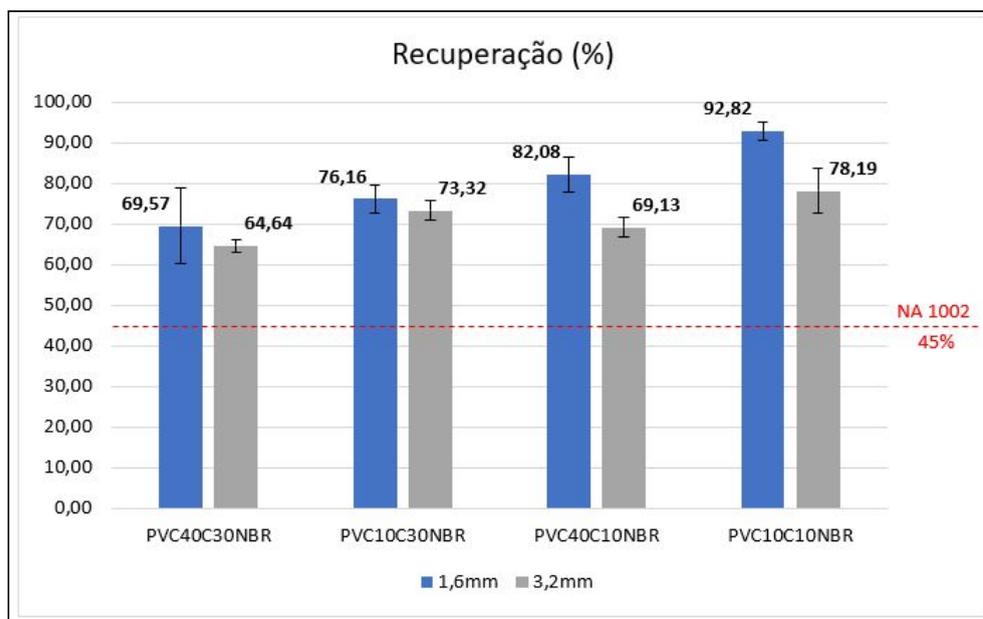


Figura 26. Gráfico dos resultados para Taxa de Recuperação com referência da NA 1002.

Fonte: Própria.

Em comparação as composições estudadas por Dantas et al. (2019), as Tabelas 8 e 9 apresentam os resultados lado a lado. Quanto à compressão, as blendas obtiveram maiores taxas do que as composições puras de PVC (1,96% - 8,57% para as blendas e 2,95% - 5,00% para as composições de PVC), conseguindo alcançar a faixa de referência da NA 1002 de 7% até 17%, como notado na Figura 25, embora não tenham chegado a atingir valores satisfatórios. Consequentemente, para a Recuperação, conseguiu-se reduzir mais esta taxa com a blenda PVC40C30NBR com 64,64%, as outras blendas ficaram com valores muito próximos ou até mais altos aos das composições de PVC de Dantas et al. (2019), ambos estudos apresentaram Recuperações mais altas do que o ideal, quando comparadas ao NA 1002 que possui taxa de 45% de recuperação.

Tabela 8: Comparação entre a Compressão das Blendas PVC/NBR com as composições de PVC para juntas estudadas por Dantas et al. (2019).

Compressão(%)			Compressão(%) (DANTAS et al 2019)	
PVC40C30NBR	1,6mm	7,95	PVCC50P20	5,00
	3,2mm	8,12		
PVC10C30NBR	1,6mm	7,76	PVCC60P20	3,60

	<b>3,2mm</b>	8,57	
<b>PVC40C10NBR</b>	<b>1,6mm</b>	2,24	<b>PVCC50P10</b> 2,95
	<b>3,2mm</b>	7,45	
<b>PVC10C10NBR</b>	<b>1,6mm</b>	1,96	-
	<b>3,2mm</b>	3,45	

Fonte: Própria; (DANTAS et al. 2019).

Tabela 9: Comparação entre a Recuperação das Blindas PVC/NBR com as composições de PVC para juntas estudadas por Dantas et al. (2019).

Recuperação(%)			Recuperação(%) (DANTAS et al 2019)	
<b>PVC40C30NBR</b>	<b>1,6mm</b>	69,57	<b>PVCC50P20</b>	72,60
	<b>3,2mm</b>	64,64		
<b>PVC10C30NBR</b>	<b>1,6mm</b>	76,16	<b>PVCC60P20</b>	85,70
	<b>3,2mm</b>	73,32		
<b>PVC40C10NBR</b>	<b>1,6mm</b>	82,08	<b>PVCC50P10</b>	85,20
	<b>3,2mm</b>	69,13		
<b>PVC10C10NBR</b>	<b>1,6mm</b>	92,82	-	
	<b>3,2mm</b>	78,19		

Fonte: Própria; (DANTAS et al. 2019).

Quanto a análise estatística dos resultados para a Compressão e Recuperação, os gráficos de interações e efeitos mostrados nas Figuras 27, 28, 29 e 30 demonstram que a NBR atua como fator de maior influência para ambas variáveis analisadas, assim como evidência que não ocorreu interação entre os fatores, mesmo quando a espessura foi considerada um fator no modelo fatorial 2<sup>3</sup>. As Tabelas 10, 11 e 12 apresentam a ANOVAs, mostrando que houve significância para haver interpretação em conformidade ao Valor-P para a Compressão nos modelos 2<sup>2</sup> e 2<sup>3</sup>, e para a Recuperação no modelo 2<sup>3</sup>.

Tabela 10: ANOVA com significância para a Compressão, pelo fatorial 2<sup>2</sup>(1,6mm).

<b>Análise de Variância para Compressão - fatorial 2<sup>2</sup>(1,6mm)</b>					
<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ (Aj.)</b>	<b>QM (Aj.)</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor-P</b>
<b>Modelo</b>	2	33,1584	16,5792	8578,68	0,008
<b>Linear</b>	2	33,1584	16,5792	8578,68	0,008
<b>Carga mineral</b>	1	0,0553	0,0553	28,60	0,118
<b>NBR</b>	1	33,1031	33,1031	17128,76	0,005
<b>Erro</b>	1	0,0019	0,0019		
<b>Total</b>	3	33,1603			

Fonte: Própria.

Tabela 11: ANOVA com significância para a Compressão, pelo fatorial 2<sup>3</sup>.

<b>Análise de Variância para Compressão (%) - fatorial 2<sup>3</sup></b>					
<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ (Aj.)</b>	<b>QM (Aj.)</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor-P</b>
<b>Modelo</b>	3	46,777	15,592	6,09	0,057
<b>Linear</b>	3	46,777	15,592	6,09	0,057
<b>Carga mineral</b>	1	2,025	2,025	0,79	0,424
<b>NBR</b>	1	37,405	37,405	14,60	0,019
<b>Espessura</b>	1	7,346	7,346	2,87	0,166
<b>Erro</b>	4	10,245	2,561		

Fonte: Própria.

Tabela 12: ANOVA com significância para a Recuperação, pelo fatorial 2<sup>3</sup>.

<b>Análise de Variância para Recuperação (%) - fatorial 2<sup>3</sup></b>					
<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ (Aj.)</b>	<b>QM (Aj.)</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor-P</b>
<b>Modelo</b>	3	495,48	165,16	12,37	0,017
<b>Linear</b>	3	495,48	165,16	12,37	0,017
<b>Carga mineral</b>	1	153,70	153,70	11,51	0,027
<b>NBR</b>	1	185,58	185,58	13,90	0,020
<b>Espessura</b>	1	156,20	156,20	11,70	0,027
<b>Erro</b>	4	53,40	13,35		

Fonte: Própria.

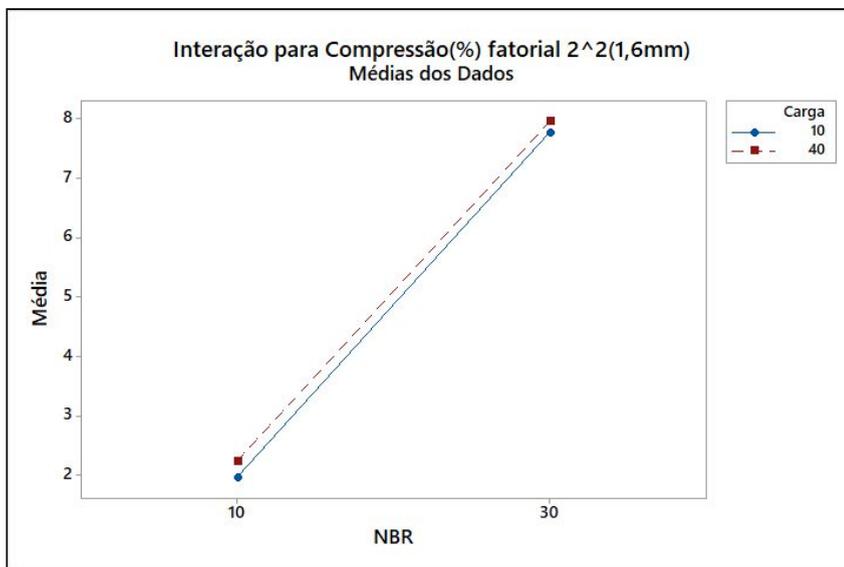


Figura 27. Gráfico de interações e efeitos para Compressão, pelo fatorial 2<sup>2</sup>(1,6mm).

Fonte: Própria.

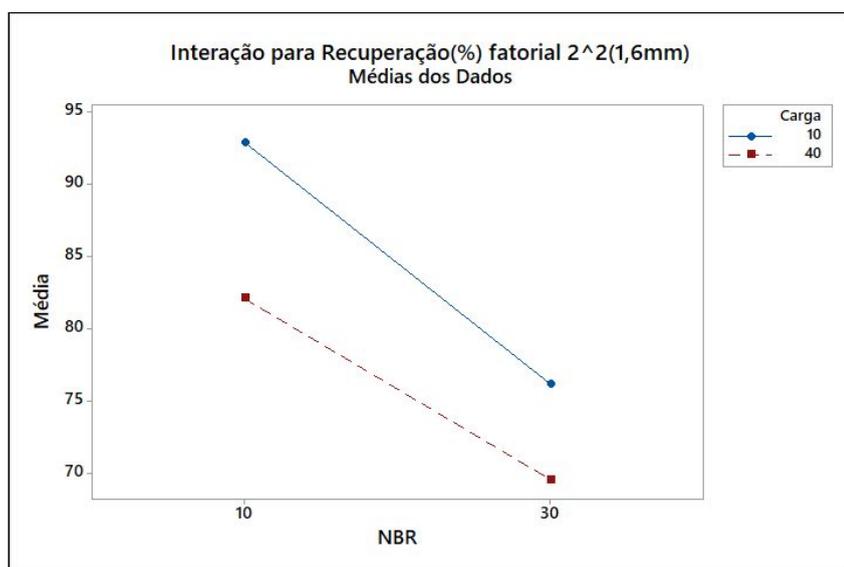


Figura 28. Gráfico de interações e efeitos para Recuperação, pelo fatorial 2<sup>2</sup>(1,6mm).

Fonte: Própria.

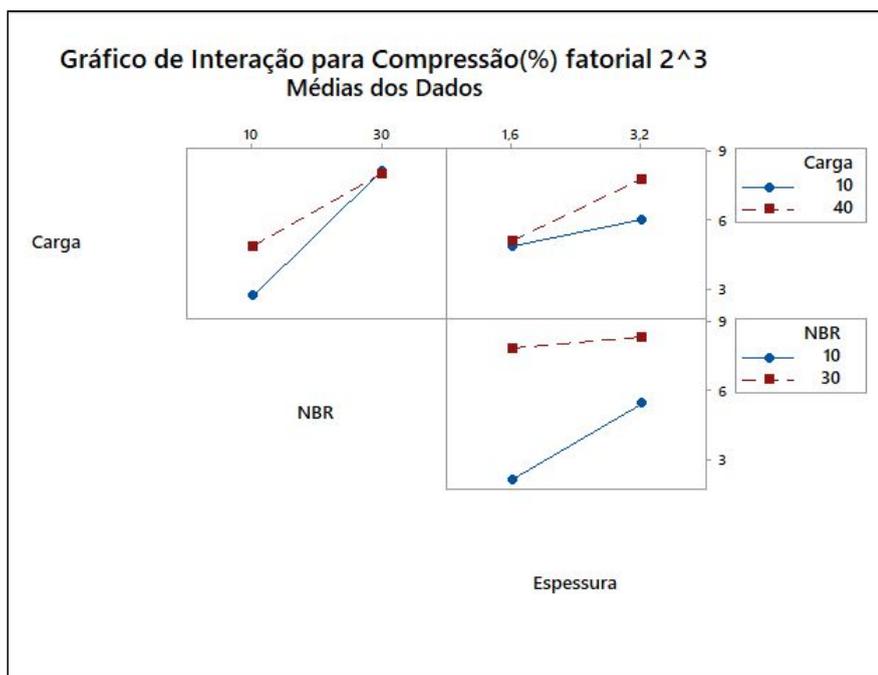


Figura 29. Gráfico de interações e efeitos para Compressão, pelo fatorial 2<sup>3</sup>.

Fonte: Própria.

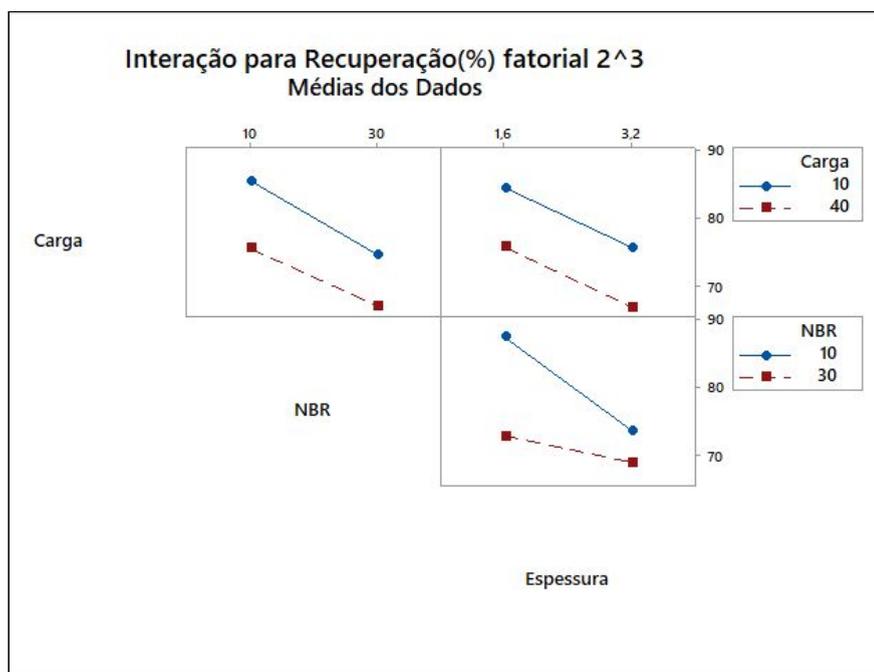


Figura 30. Gráfico de interações e efeitos para Recuperação, pelo fatorial 2<sup>3</sup>.

Fonte: Própria.

Desta forma, pode-se seguir para a análise dos gráficos de Pareto de ambas variáveis, mostrados nas Figuras 31, 32 e 33. Para a compressão, quando os fatores Carga mineral e NBR são analisados sozinhos no modelo fatorial 2<sup>2</sup> para as

placas de 1,6mm fica claro que a adição da NBR na composição do PVC gerou a maior influência na diferença dos resultados, e ainda, pelo modelo fatorial  $2^3$  é possível identificar que para esta característica avaliada a variação da espessura gera uma influência maior que a variação de carga, embora não tenha atingido a significância para avaliar sua influência na Compressão. Para a Recuperação, obteve uma observação de demanda atenção no modelo fatorial  $2^3$ . A NBR novamente mostrou-se ser o fator que ao variar gerou maior influência na mudança dos resultados da Recuperação, mas também os dois outros fatores, Carga mineral e Espessura, também tiveram significância na determinação da influência, sendo a variação da Espessura o fator de maior influência logo após o teor de NBR, isto traz a luz que no que se diz a respeito a Recuperação da juntas produzida com estas blendas a espessura deve ser um elemento de atenção, que pode até mesmo influenciar a Selabilidade, como será analisado nas seções seguintes deste trabalho.

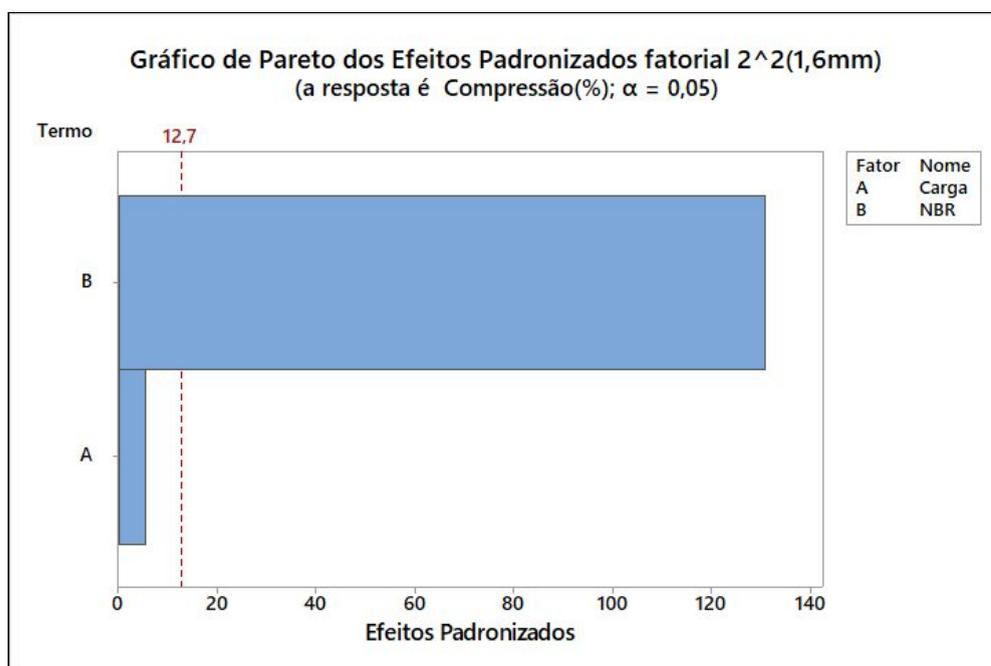


Figura 31. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para Compressão, pelo fatorial  $2^2(1,6mm)$ . Fonte: Própria.

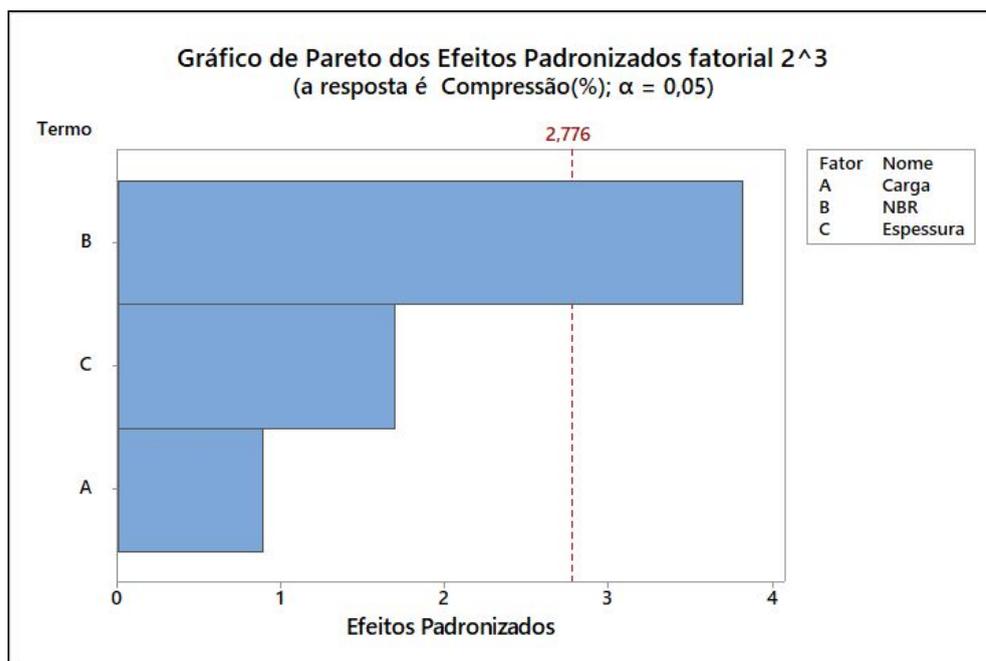


Figura 32. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para Compressão, pelo fatorial  $2^3$ .

Fonte: Própria.

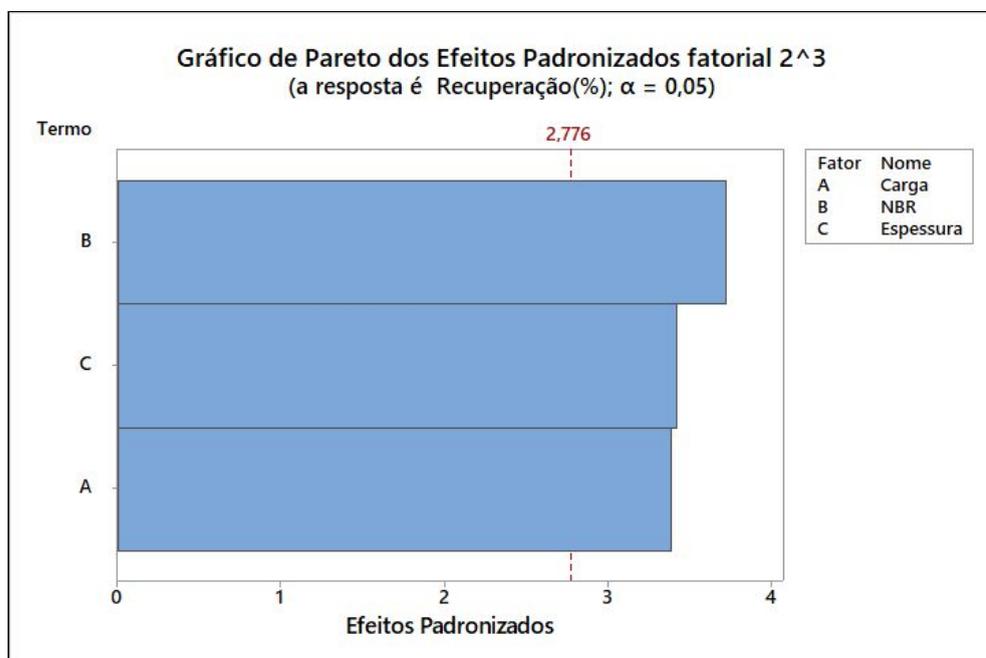


Figura 33. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para Recuperação, pelo fatorial  $2^3$ .

Fonte: Própria.

A partir destas análises seguiu-se com a elaboração dos gráficos de Contorno para possibilitar o direcionamento das formulações para otimizar os resultados,

que podem ser vistos nas Figuras 34, 35, 36 e 37. Para ambas as espessuras estudadas, a maior Compressão é alcançada com os maiores teores de NBR e Carga mineral, no caso da Recuperação, há uma diferença notável entre as espessuras, pois com 3,2mm é possível conseguir os menores valores, ao aumentar os teores de NBR e Carga mineral.

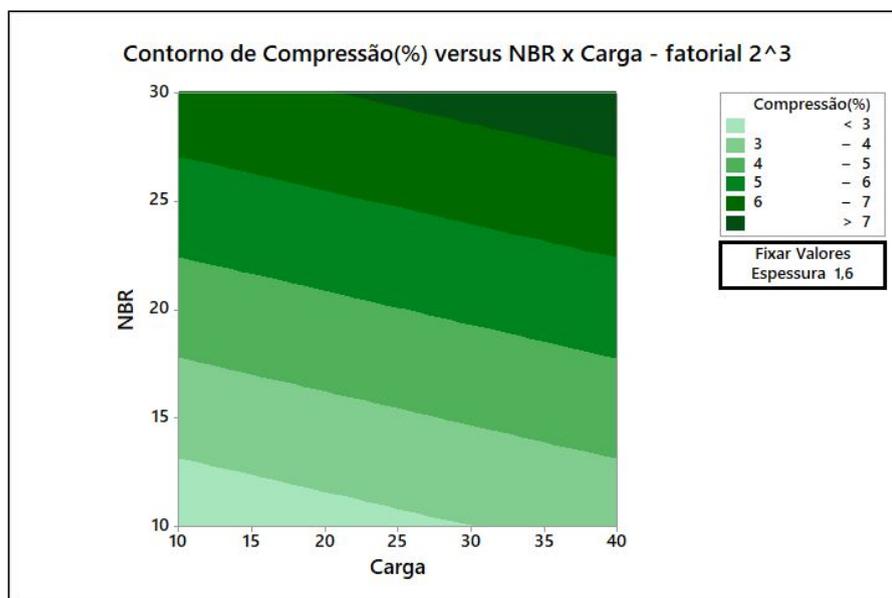


Figura 34. Gráfico de Contorno para Compressão, com Espessura fixada em 1,6mm, pelo fatorial 2<sup>3</sup>. Fonte: Própria.

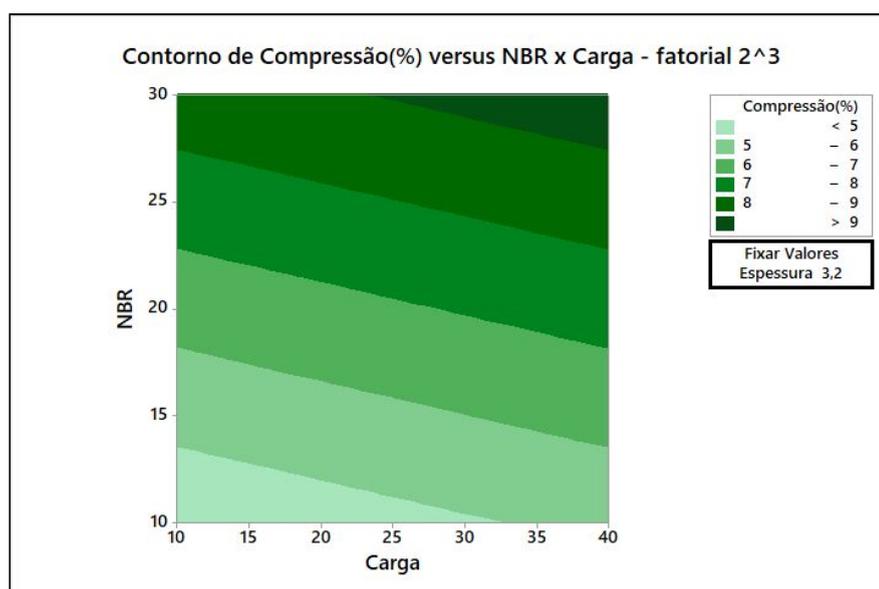


Figura 35. Gráfico de Contorno para Compressão, com Espessura fixada em 3,2mm, pelo fatorial 2<sup>3</sup>. Fonte: Própria.

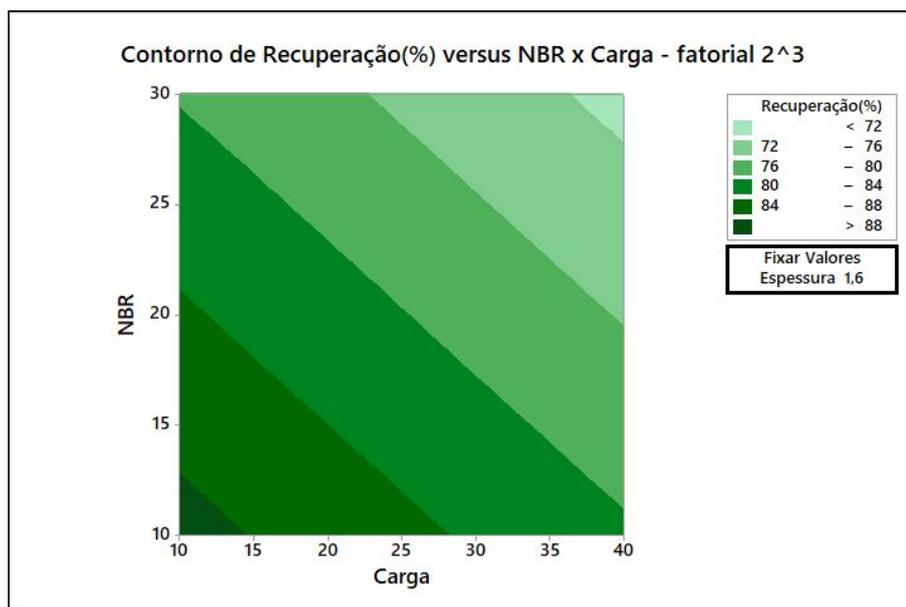


Figura 36. Gráfico de Contorno para Recuperação, com Espessura fixada em 1,6mm, pelo fatorial  $2^3$ . Fonte: Própria.

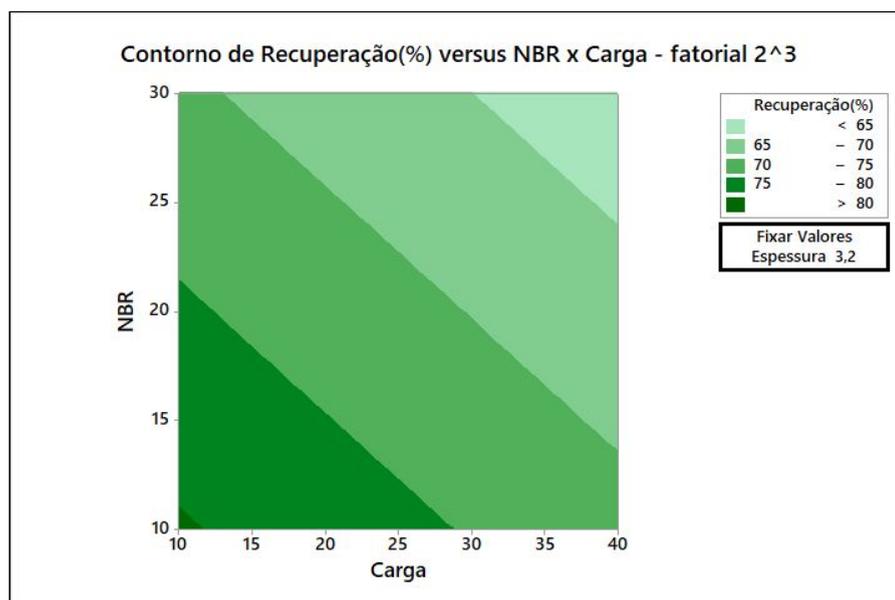


Figura 37. Gráfico de Contorno para Recuperação, com Espessura fixada em 3,2mm, pelo fatorial  $2^3$ . Fonte: Própria.

#### 4.3. Resistência à Tração

As Figuras 38 e 39 apresentam os resultados para a Resistência à tração na direção transversal à laminação, para as placas de 1,6mm e 3,2mm, e na direção

paralela à laminação para a placas de 1,6mm. Os resultados revelaram que não houve diferença significativa entre os resultados quanto a direção avaliada. Dentre os resultados a formulação com melhor desempenho foi a PVC10C10NBR, chegando até 443,87kgf/cm<sup>2</sup>. Tal desempenho pode ser associado primeiramente ao menor teor de Carga mineral desta formulação que influenciou a dureza, ou rigidez, do material como notado nos ensaios de Marçal e Martins (2020), pois como Rabello (2000) explica, em geral o uso de cargas minerais pode modificar a rigidez e a resistência a tração do composto, dentre outras características. Outro fator associado aumento da resistência pode ser o baixo teor de NBR, como Passador et al. (2008) também identificou em suas blendas PVC/NBR, elastômeros possuem módulos de elasticidade relativamente baixos, assim, aumentando-se o teor de NBR na composição das blendas verifica-se a diminuição do módulo elástico, e conseqüentemente a redução da resistência à tração para as blendas com maiores teores de NBR.

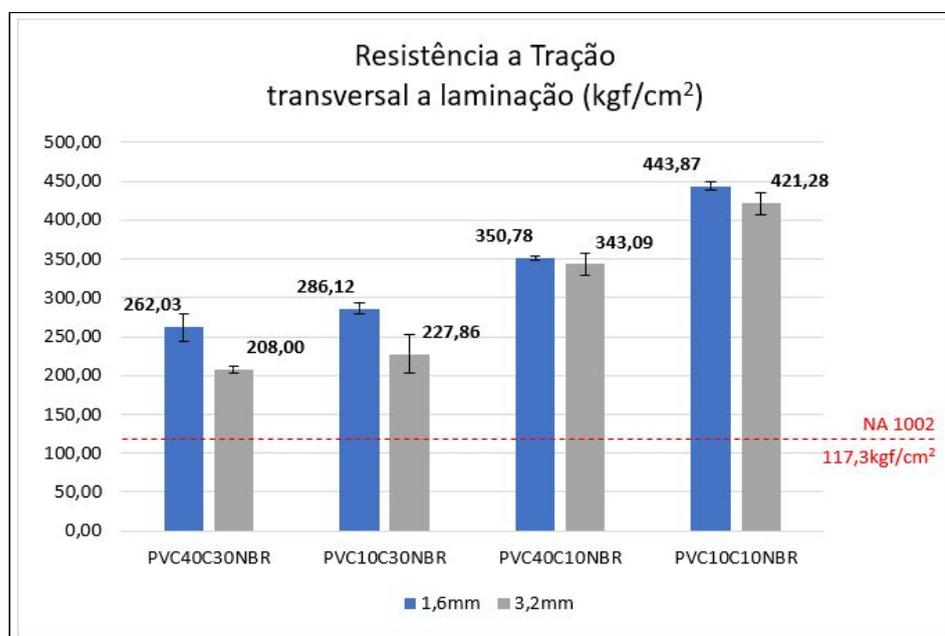


Figura 38. Gráfico dos resultados para Resistência a tração na direção transversal a laminação, de amplas espessuras, com referência da NA 1002.

Fonte: Própria.

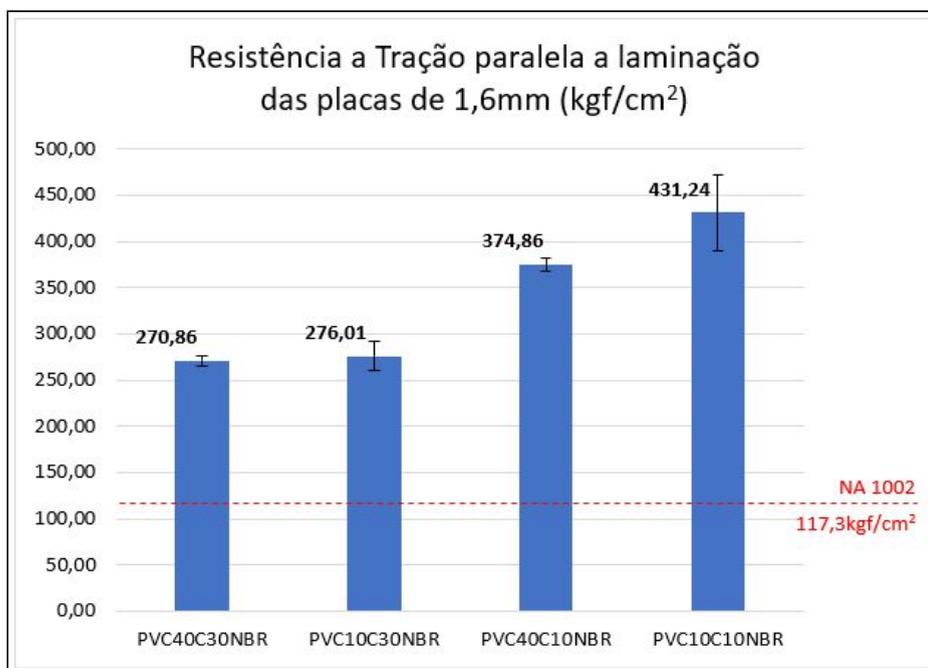


Figura 39. Gráfico dos resultados para Resistência a tração na direção paralela a laminação, das placas com 1,6mm de espessura, com referência da NA 1002.

Fonte: Própria.

A Tabela 13 mostra a comparação entre os resultados obtidos para a resistência à tração com os encontrados por Dantas et al.(2019). Assim como os compostos de PVC Dantas et al.(2019), as blendas de PVC/NBR conseguiram superar com êxito esta propriedade quando comparados ao material de referência, a junta NA 1002 da Teadit, como pode ser visto também nas Figuras 38 e 39. Pode-se perceber também que ambos estudos alcançaram resultados muito próximos ao variar a Carga mineral, revelando que ambos, além de terem resistência satisfatória, possuem rendimento similar.

Tabela 13: Comparação entre a Resistência à Tração no sentido Transversal das Blendas PVC/NBR com as composições de PVC para juntas estudadas por Dantas et al. (2019).

Resistência à Tração(kgf/cm²)			Resistência à Tração(kgf/cm²) (DANTAS et al 2019)	
PVC40C30NBR	1,6mm	262,03	PVCC50P20	260,03
	3,2mm	208,00		
PVC10C30NBR	1,6mm	286,12	PVCC60P20	301,84
	3,2mm	227,86		

<b>PVC40C10NBR</b>	<b>1,6mm</b>	350,78	<b>PVCC50P10</b>	432,36
	<b>3,2mm</b>	343,09		
<b>PVC10C10NBR</b>	<b>1,6mm</b>	443,87	-	
	<b>3,2mm</b>	421,28		

Fonte: Própria; (DANTAS et al. 2019).

Quanto a análise estatística dos resultados para a Resistência à Tração, os gráficos de interações e efeitos mostrados nas Figuras 40 e 41 demonstram que a NBR atua como fator de maior influência, seguido pelo fator Carga mineral. A espessura não gerou influência significativa nestes resultados. Nesta análise, apenas a ANOVA para o modelo fatorial 2<sup>3</sup> demonstrou significância, mostrada na Tabela 14. Desta forma, seguiu-se para a análise dos gráficos de Pareto e Contorno conforme este modelo fatorial, mostrados nas Figuras 42, 43 e 44.

A partir do gráfico de Pareto, é possível identificar que tanto o teor de NBR como o de Carga mineral tiveram significância na influência desta propriedade, mas o teor de NBR foi substancialmente o de maior efeito nos resultados. Dessa forma gerou-se os gráficos de Contorno para as duas espessuras, mostrando que o direcionamento para otimizar esta propriedade seria a redução de ambos teores. Por estes gráficos é possível também observar que se necessário modificar os teores de Carga mineral e NBR para adequar outras propriedades, a Resistência a tração não será significamente afetada, possuindo uma grande faixa de liberdade em acordância com os parâmetros comparados com a Junta NA 1002.

Tabela 14: ANOVA com significância para a Resistência à Tração, pelo fatorial 2<sup>3</sup>.

<b>Análise de Variância para Resistência à Tração (kgf/cm<sup>2</sup>) - fatorial 2<sup>3</sup></b>					
<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ (Aj.)</b>	<b>QM (Aj.)</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor-P</b>
<b>Modelo</b>	3	49661	16553,7	22,62	0,006
<b>Linear</b>	3	49661	16553,7	22,62	0,006
<b>Carga mineral</b>	1	5791	5790,9	7,91	0,048

<b>NBR</b>	1	41330	41329,6	56,48	0,002
<b>Espessura</b>	1	2541	2540,8	3,47	0,136
<b>Erro</b>	4	2927	731,8		

Fonte: Própria.

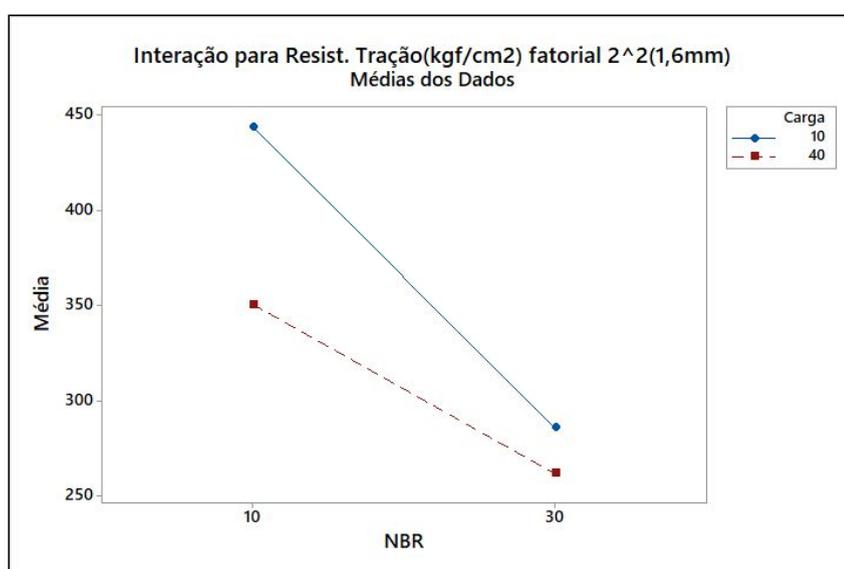


Figura 40. Gráfico de interações e efeitos para Resistência a Tração, pelo fatorial 2<sup>2</sup>(1,6mm). Fonte: Própria.

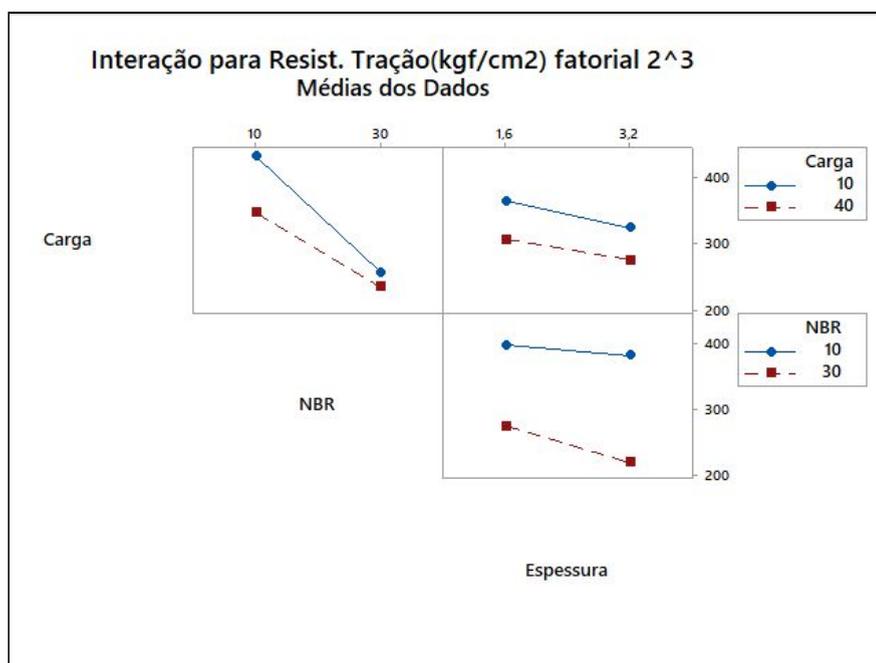


Figura 41. Gráfico de interações e efeitos para Resistência a Tração, pelo fatorial 2<sup>3</sup>.  
Fonte: Própria.

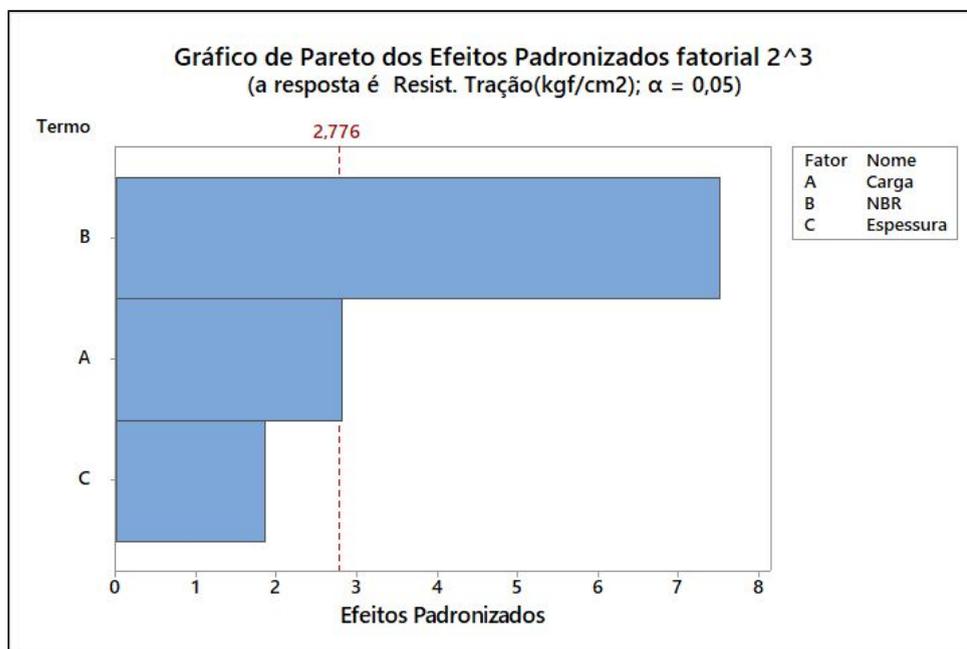


Figura 42. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para Resistência a Tração, pelo fatorial  $2^3$ . Fonte: Própria.

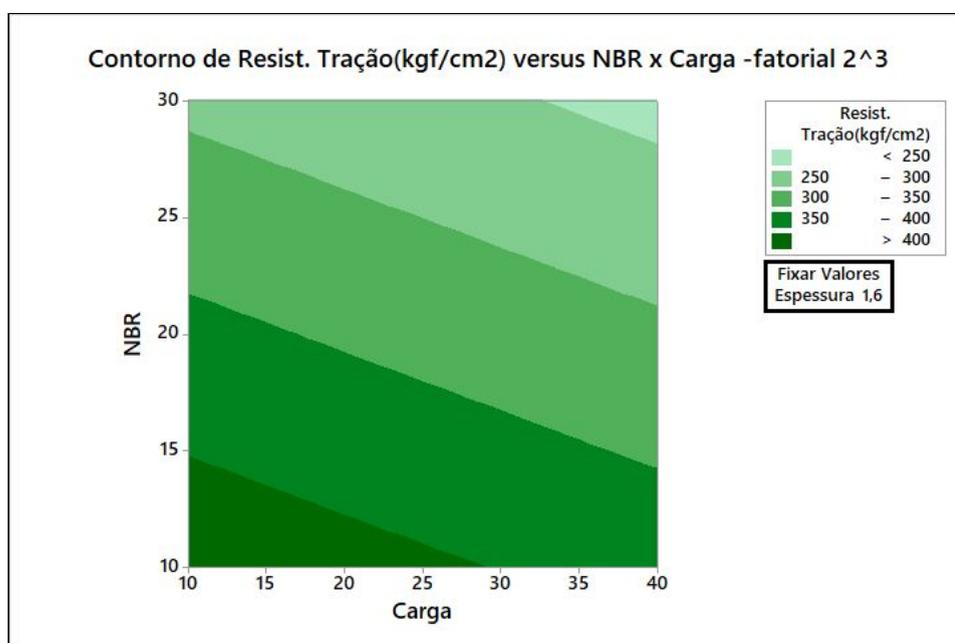


Figura 43. Gráfico de Contorno para Resistência a Tração, com Espessura fixada em 1,6mm, pelo fatorial  $2^3$ . Fonte: Própria.

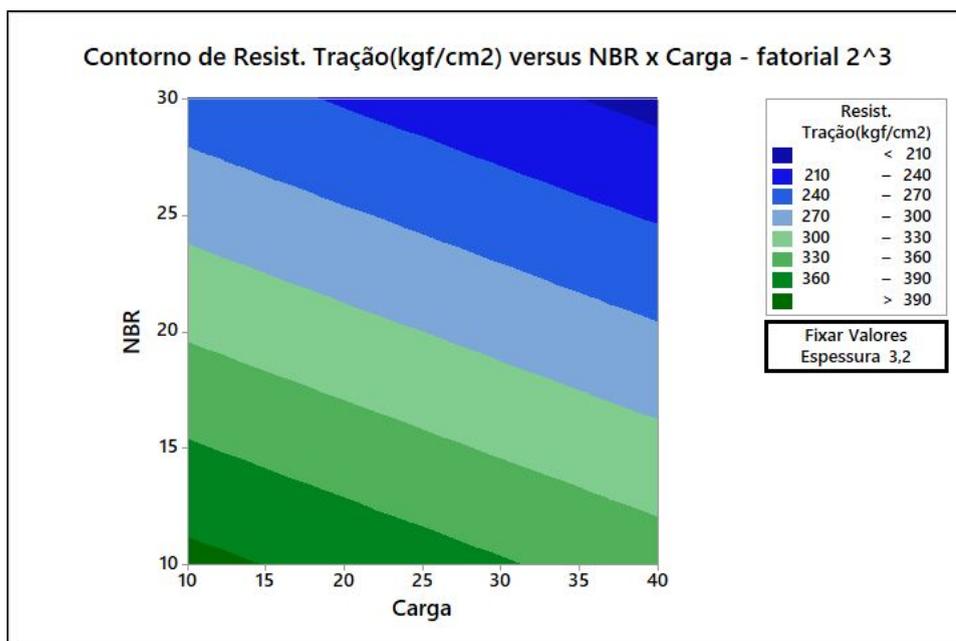


Figura 44. Gráfico de Contorno para Resistência a Tração, com Espessura fixada em 3,2mm, pelo fatorial 2<sup>3</sup>. Fonte: Própria.

#### 4.4. Relaxamento Creep (PQR)

A partir da Figura 45 é possível visualizar os resultados obtidos para o Relaxamento *Creep*. Os resultados do fator PQR revelam que as blendas não conseguiram atingir valores satisfatórios, usando como referência o material NA 1002 da Teadit. Este baixo rendimento é mesmo menor do que os encontrados por Dantas et al (2019) para as suas composições de PVC, que chegaram a alcançar o PQR na faixa de 13% até 26%, como pode ser visto na Tabela 15 que compara estes resultados. Todas as formulações avaliadas apresentaram significativa perda de aperto quando submetidas a uma temperatura de 70°C, sendo que a formulação PVC10C10NBR de 3,2 mm perdeu todo o aperto aplicado. Esta redução pode estar associada a presença da NBR nas composições das blendas, pois como também notado nos comportamentos térmicos verificados por Marçal e Martins (2020) a miscibilidade da blenda pode ser comprovada através da microscopia e análises térmicas devido a presença de um único ponto de transição vítrea. A miscibilidade é comprovada quando os segmentos se misturam

sem que haja qualquer segregação entre as moléculas, ou seja, homogeneidade na mistura do PVC com a NBR e esse fator influencia na redução da resistência ao aperto ao longo tempo e a temperatura de 70°C ao qual as formulações foram submetidas, reduzindo a temperatura de amolecimento das blendas e conseqüentemente limitando a temperatura de serviço para estes materiais.

Segundo Drobny (2007) esse tipo de comportamento em blendas de PVC contendo NBR, pode ser atribuído aos reticulados no elastômero combinados com a ligação de hidrogênio entre o PVC e o NBR. À medida que a temperatura aumenta, a ligação do hidrogênio se torna gradualmente mais fraca e, eventualmente, a resistência mecânica depende apenas da NBR. Stockdale (1990) também nota o comportamento de perda nas características mecânicas, como resistência a tração ou compressão, em blendas típicas de PVC/NBR em temperaturas mais altas, que pode ser comparado a perda total do aperto nas blendas estudadas neste trabalho.

Outro ponto a se avaliar, conforme Patrick (2005) explica, é que as propriedades de misturas poliméricas miscíveis podem ser intermediárias entre as dos componentes individuais, tendo comportamento de aditivo, como é tipicamente o caso de Tg. Em alguns casos, as propriedades da blenda podem exibir desvio tanto positivos quanto negativo da “aditivção”. No caso do comportamento térmico ou na fluência, o ganho no volume livre corresponde a uma alteração positiva na blenda devido a interações favoráveis para tal entre os polímeros. Ainda segundo ao autor, no uso de NBR em blendas com PVC, o elastômero pode agir como flexibilizante e plastificante interno tornando a blenda um Termoplástico elastômero. Essa plastificação interna é um efeito produzido por grupos estruturais incorporados ao polímero, que também tem o efeito de diminuir a Tg, e neste caso a alta viscosidade do fundido (também no acréscimo da temperatura de trabalho do material) pode ser um problema. Embora esse fator possa ter gerado influências no Relaxamento creep das formulações, é relativamente difícil fazer afirmações sem conhecer as características de reometria e termodinâmica das blendas, o que

levanta a necessidade de se realizar ensaios focados nessas propriedades de fluxo para um melhor entendimento.

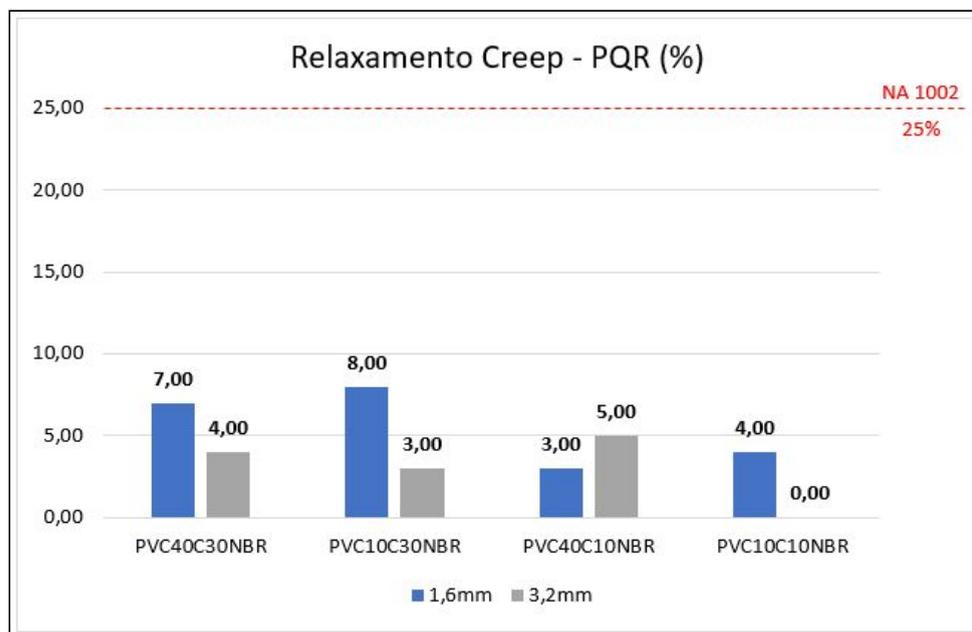


Figura 45. Gráfico dos resultados para Relaxamento *Creep* - Fator PQR, com referência da NA 1002. Fonte: Própria.

Tabela 15: Comparação entre o Relaxamento *Creep*(PQR) das Blendas PVC/NBR com as composições de PVC para juntas estudadas por Dantas et al. (2019).

	PQR(%)		PQR(%) (DANTAS et al 2019)	
	1,6mm	3,2mm		
PVC40C30NBR	1,6mm	7	PVCC50P20	16
	3,2mm	4		
PVC10C30NBR	1,6mm	8	PVCC60P20	13
	3,2mm	3		
PVC40C10NBR	1,6mm	3	PVCC50P10	26
	3,2mm	5		
PVC10C10NBR	1,6mm	4	-	
	3,2mm	0		

Fonte: Própria; (DANTAS et al. 2019).

Quanto a análise estatística dos resultados para o Relaxamento *Creep* pelo fator PQR, os gráficos de interações e efeitos mostrados na Figuras 46 e 47

apresentam que para as duas metodologias fatoriais  $2^2$  e  $2^3$  não é possível identificar qual fator obteve maior influência nesta variável de resposta, assim como mostra que não ocorreu interação entre os fatores. Da mesma forma, a ANOVA para ambos métodos não apresentou significância o suficiente para que possam ser tiradas conclusões estatísticas deste ensaio, para atingir essa significância seria necessário refazer os ensaios, com mais níveis ou réplicas para cada fator, conforme indica Montgomery (2017).

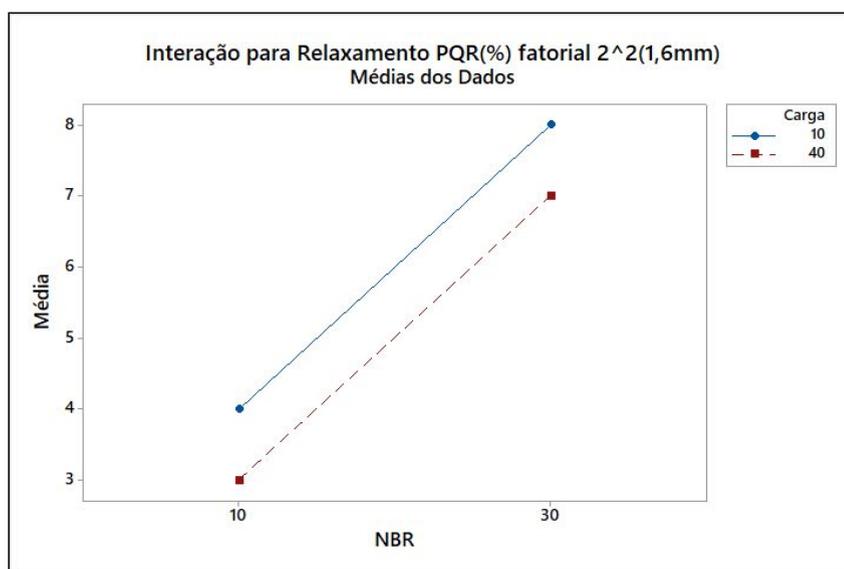


Figura 46. Gráfico de interações e efeitos para Relaxamento Creep, pelo fatorial  $2^2(1,6\text{mm})$ .

Fonte: Própria.

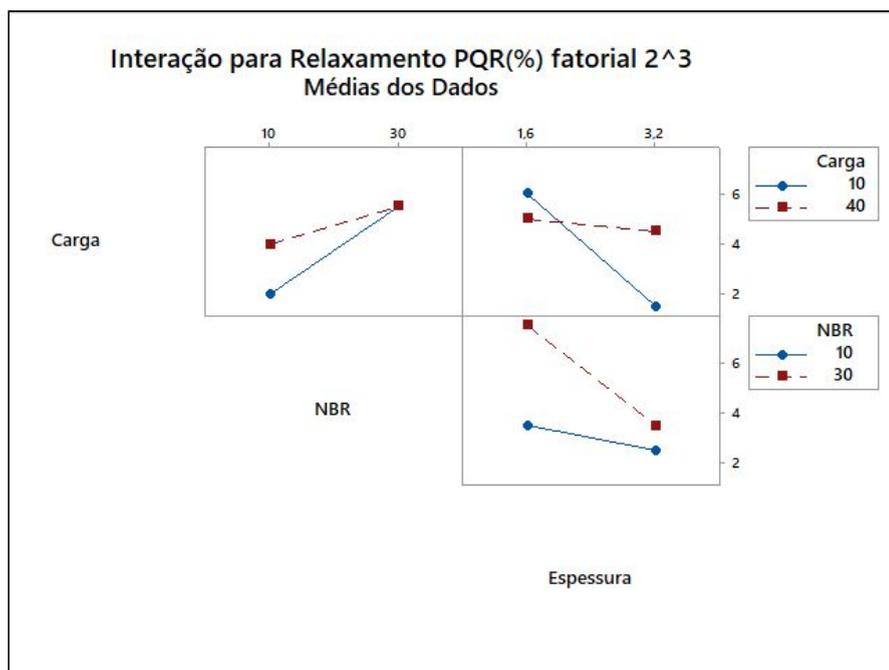


Figura 47. Gráfico de interações e efeitos para Relaxamento Creep, pelo fatorial 2<sup>3</sup>.

Fonte: Própria.

#### 4.5. Selabilidade com Nitrogênio

No gráfico da Figura 48 se encontram os resultados da selabilidade com nitrogênio para as formulações previamente estabelecidas. Nota-se que quando comparamos essas formulações com a NA1002 que possui uma taxa de vazamento usual de 0,25 mL/h, os resultados em sua maioria foram considerados inferiores a ela, visto que quanto menor a taxa de vazamento melhor será a selabilidade, essa redução variou de 73% (PVC40C10NBR) a 90% (PVC40C30NBR). Embora a PVC10C10NBR tenha apresentado selabilidade superior a NA1002 na espessura de 3,2mm, não se pode tirar uma conclusão de aprovação sobre ela devido à variação dos resultados apresentados para o ensaio. Um fator importante para uma boa selabilidade é a densidade do material que impacta diretamente no desempenho da junta. De acordo com a literatura é possível dizer que quanto maior a densidade, melhor é o desempenho da vedação e que materiais que têm baixa densidade apresentam alto grau de compressibilidade, mas a vedação não é tão boa quanto os que apresentam alta densidade (>1,36 g/cm<sup>3</sup>) (Onat, 2008). Então, levando em consideração o ensaio

de densidade, isso se justifica uma melhor selabilidade para a PVC10C10NBR onde tem  $1,37 \text{ g/cm}^3$ .

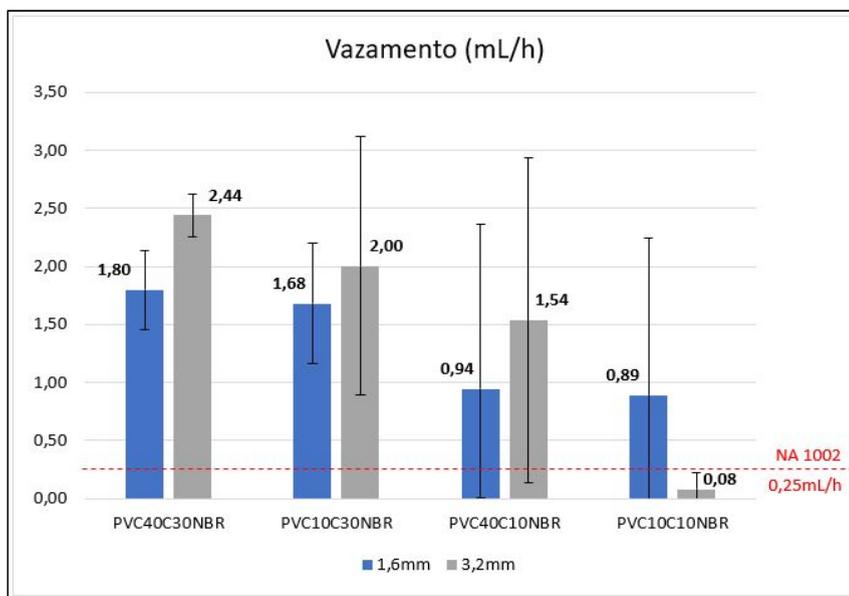


Figura 48. Gráfico dos resultados para Taxa de Vazamento, com referência da NA 1002.

Fonte: Própria.

A partir da Tabela 16 é possível notar que no trabalho de Dantas et al. (2019) também foi verificado o mesmo comportamento de grande variação nos resultados da selabilidade para as composições de PVC.

Tabela 16: Comparação entre o Selabilidade(Vazamento) das Blendas PVC/NBR com as composições de PVC para juntas estudadas por Dantas et al. (2019).

Vazamento(mL/h)			Vazamento(mL/h) (DANTAS et al 2019)	
PVC40C30NBR	1,6mm	1,80	PVCC50P20	0,33 e 0,08
	3,2mm	2,44		
PVC10C30NBR	1,6mm	1,68	PVCC60P20	0,17 e 0,17
	3,2mm	2,00		
PVC40C10NBR	1,6mm	0,94	PVCC50P10	3,33 e 32,08
	3,2mm	1,54		
PVC10C10NBR	1,6mm	0,89	-	
	3,2mm	0,08		

Fonte: Própria; (DANTAS et al. 2019).

Seguindo, pela análise da ANOVA, para ambos métodos não obteve-se significância o suficiente para que possam ser tiradas conclusões estatísticas este ensaio, para atingir essa significância também seria necessário refazer os ensaios, com mais níveis ou réplicas para cada fator, conforme explica Montgomery (2017), mas é necessário atentar que no caso da espessura, embora pode-se variar entre dois valores neste estudo, não há liberdade para mudanças nesse fator, pois são fatores estabelecidos pela aplicação, ou seja, são valores fixos que não permitem variações visando otimizações, sendo necessário adequar os outros fatores a este. Os gráficos de interações e efeitos mostrados na Figuras 49 e 50 apresentam que para as duas metodologias fatoriais  $2^2$  e  $2^3$ , assim como para o PQR, não é possível identificar qual fator obteve maior influência nesta variável de resposta, mas no caso da Selabilidade foi possível identificar que ocorreu interação entre o fator Espessura e os outros fatores (Teor de Carga mineral e NBR), isso indica que, conforme notado também na análise da Recuperação, que a espessura da junta gera efeitos diferentes quando relacionado aos teores de Carga mineral ou NBR.

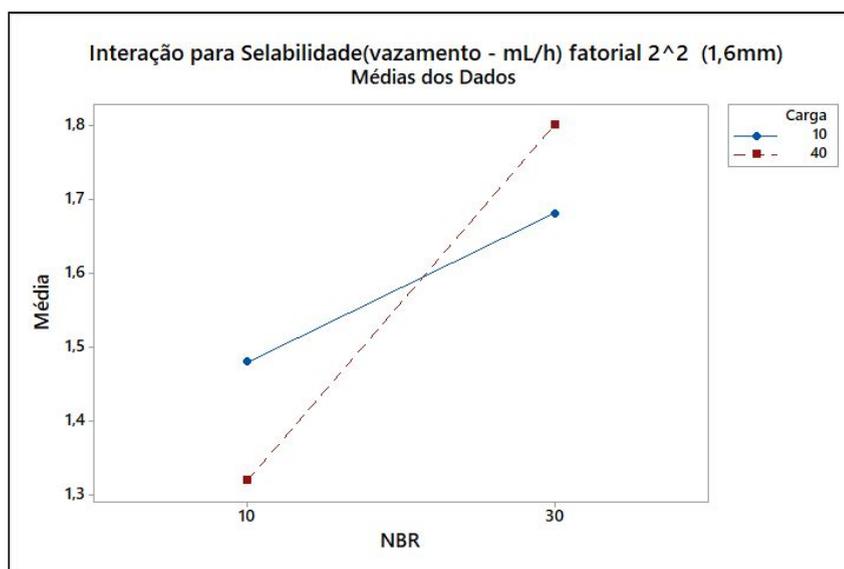


Figura 49. Gráfico de interações e efeitos para Selabilidade(vazamento), pelo fatorial  $2^2$ (1,6mm).

Fonte: Própria.

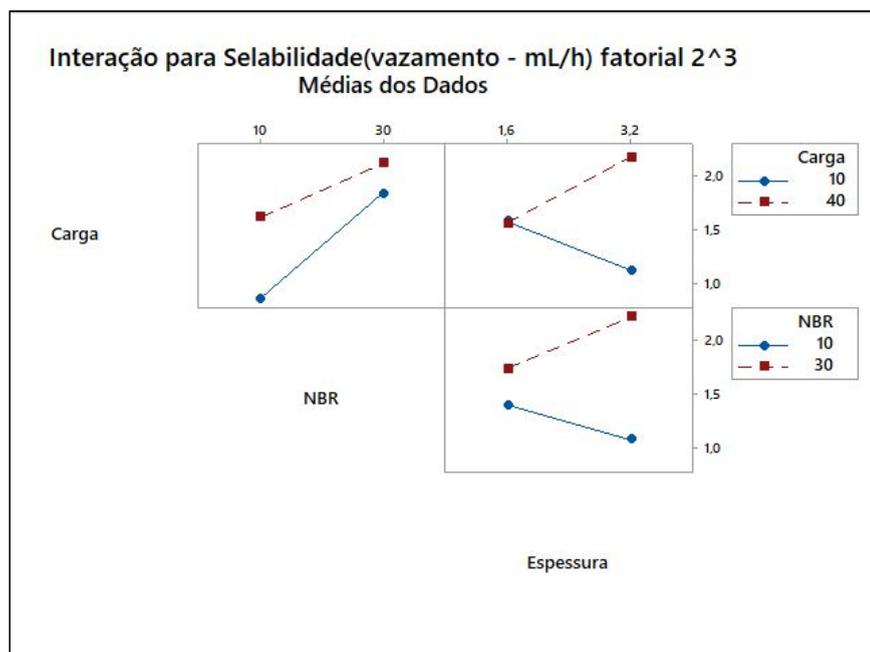


Figura 50. Gráfico de interações e efeitos para Selabilidade(vazamento), pelo fatorial  $2^3$ .

Fonte: Própria.

## 5 CONCLUSÕES

Na análise geral do desempenho das formulações, as blendas estudadas não obtiveram as propriedades desejadas para aplicação como juntas para ligações flangeadas. Os ensaios mecânicos testados são cruciais para dizer como o material se comportaria como elemento de vedação, e em sua grande maioria os resultados alcançados não foram satisfatórios. As conclusões específicas de cada propriedade importante a aplicação estão listadas a seguir:

- A Compressão não atingiu a faixa necessária para se equiparar a Junta de Aramida e NBR NA 1002 da Teadit. Os valores baixos da compressão das blendas resultaria em uma má selagem dos flanges;
- A Recuperação da compressão também não foi satisfatória por ter atingido valores muito altos, maiores do que comparado a NA 1002, relevando que os materiais poderiam perder bastante a capacidade de selar quando o aperto for removido das juntas, o que pode gerar acidentes;
- A Resistência à Tração foi a única propriedade que se obteve valores satisfatórios, como esperado de uma blenda com maiores de PVC (variando sob o efeito da carga mineral utilizada ( $\text{CaCO}_3$ ) e da NBR) chegando a superar bastante a resistência da junta de referência NA 1002;
- Para o fator PQR do Relaxamento *Creep* não foram obtidos resultados satisfatórios, pois foram consideravelmente menores do que o mesmo fator da NA 1002, podendo se concluir que essas blendas, ao serem aplicadas como juntas, não teriam o desempenho necessário a temperaturas maiores do 70°C, o que limitaria muito o seu uso;
- Para a Selabilidade, os resultados apresentaram muita variação, revelando que o material, devido provavelmente ao percebido nas outras propriedades, não é capaz de manter uma selabilidade constante e segura o suficiente para a aplicação estudada.

Embora as propriedades estudadas não tenham atingido os valores necessários, o estudo revelou que, no geral, as formulações com maior teor de NBR

se aproximaram mais ao adequado para a aplicação proposta, podendo-se considerar que a melhor formulação foi a PVC40C30NBR com placa de espessura de 3,2mm que alcançou a faixa desejada de compressão, obtendo também a menor taxa de recuperação, sem perder significativamente sua resistência mecânica.

Quanto a medidas para melhoria das formulações desenvolvidas neste trabalho, pode-se considerar alguns aspectos importantes. É importante que ao avaliar apenas a variação da NBR e da Carga mineral, não houve o estudo da influência ou interação entre a NBR e os aditivos utilizados na composição do PVC, bem como não foi avaliado níveis fatoriais maiores de que 2 para o Planejamento experimental, sendo assim, seria interessante conduzir o estudo variando outros fatores, com diferentes níveis de teores para gerar um estudo com ainda maior significância estatística. Outro ponto, quanto a composição, seria os teores de NBR e de Plastificante, como notado por Marçal & Martins (2020) que a borracha nitrílica gera uma influência significativa nas propriedades térmicas da blenda, como também notado neste trabalho para a fluência e características mecânicas, sendo assim seria possível diminuir o teor do plastificante, sem aumentar significativamente a rigidez da blenda, e também aumentar ainda mais o teor de NBR, verificando se ao tornar o elastômero a fase principal da blenda poderia-se alcançar as propriedades desejadas. Wimolmala et al.(2001) verificaram, ao variar a porcentagem da NBR de 0% a 40% em blendas PVC/NBR, que com o aumento do teor de NBR é possível alcançar menor módulo elástico, maior alongação e maior tenacidade( de 20% a 30% de NBR), também verificou que utilizando temperaturas menores de processamento da blenda, por mais tempo e por extrusão, consegue-se otimizar ainda mais essas propriedades.

Em comparação com as composições de PVC estudadas no trabalho de Dantas et al. (2019) as blendas obtidas neste trabalho apresentaram densidades menores, que podem ter influenciado na diferença entre a Compressão e a Recuperação. A compressibilidade foi melhor para as blendas do que para as composições de PVC, nas formulações com maiores teores de NBR, assim como a Recuperação destas formulações tenham tido também um desempenho um pouco melhor do que as composições de PVC, embora para os dois casos os valores alcançados sejam insuficientes. Para a Resistência a Tração no sentido transversal ,

os valores obtidos foram muito próximos dos obtidos por Dantas et al. (2019), para os dois estudos os valores alcançados são superiores ao necessário para a aplicação. Para o Relaxamento *Creep*, os resultados das blindas foi muito inferior ao das composições de PVC de Dantas et al. (2019), sendo bem insatisfatório mediante a aplicação desejada. Por fim, para a Selabilidade os resultados obtidos nos dois estudos apresentaram muita variância, ou seja, não pode-se garantir que os materiais analisados tenham boa selabilidade e que possam ser aplicados como elementos de vedação. Para facilidade de visualização, a Tabela 17 mostra a comparação entre as blindas, as composições de PVC de Dantas et al. (2019) e da junta de Aramida e NBR da Teadit (2019).

Tabela 17: Comparação entre as propriedades de aplicação para juntas (no geral) das blindas PVC/NBR estudadas neste trabalho, as composições de PVC Dantas et al. (2019) e o material de junta para referência da Teadit, NA 1002.

<b>Material</b>	<b>Compressão</b>	<b>Recuperação</b>	<b>Resist. Tração</b>	<b>Relaxamento Creep</b>	<b>Selabilidade</b>
<b>BLENDAS PVC/NBR</b>	pouco satisfatório	insatisfatório	satisfatório MELHOR	insatisfatório PIOR	insatisfatório PIOR
<b>COMPOSIÇÕES DE PVC</b>	insatisfatório PIOR	insatisfatório PIOR	satisfatório MELHOR	insatisfatório	insatisfatório
<b>NA 1002</b>	MELHOR	MELHOR	PIOR	MELHOR	MELHOR

Fonte: Própria; (DANTAS et al. 2019); Teadit(2019).

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido aos resultados alcançados pelos trabalhos de Dantas et al.(2019) e Marçal e Martins (2020), assim como neste trabalho, foi verificada a inviabilidade de utilização dos materiais propostos como juntas de vedação para ligações flangeadas. Desta forma, foi discutido a importância de se analisar possíveis medidas para projetos futuros, bem como a substituição do PVC por UTEU (Polietileno de ultra alto peso molecular) como material foco no desenvolvimento desta junta, conforme levantado pela Teadit, Braskem e Equipe do projeto do SENAI CIMATEC.

O UTEC, conhecido mais como PEUAPM (Polietileno de ultra alto peso molecular), ou do inglês *Ultra High Molecular Weight Polyethylene* (UHMWPE), é um polietileno com longa cadeia molecular. A alta densidade e a ausência de ramificações em sua estrutura conferem ao PEUAPM propriedades, tais como: resistência à abrasão maior que a dos outros termoplásticos, boa resistência à corrosão, alta resistência à fadiga cíclica, alta resistência à fratura por impacto, alta resistência ao tensofissuramento e baixo coeficiente de atrito. Além disso o PEUAPM é muito resistente a uma ampla gama de produtos químicos (ácidos, álcalis, solventes, combustíveis, detergentes e oxidantes), sendo quase totalmente inerte, o que faz com que seja indicado para uso em praticamente todos os tipos de ambientes agressivos ou corrosivos sob temperaturas moderadas. Mesmo em temperaturas elevadas, só é atacado por solventes aromáticos ou halogenados e por oxidantes fortes, como ácido nítrico (COUTINHO et al. 2003). Tais características são fundamentais quando se propõe estudar a aplicabilidade deste material em juntas que estarão sujeitas a diversos ambientes em tubulações. Na literatura é possível encontrar estudos da aplicação do PEUAPM em tubulações, mas apenas com foco em sua grande maioria na resistência a abrasão e lubrificação deste polímero, assim como apenas análises de sua fluência mecânica quando submetido a certas compressões, tais características são importantes também para a sua principal aplicação, como substituto de articulações artificiais do sistema ósseo humano. Desta forma, para avaliar a aplicação deste polímero

como juntas de vedação seria imprescindível estudar a Compressibilidade associada a Recuperação, bem como a Selabilidade (em termos de vazamento, mL/h) e o Relaxamento Creep, fluência associada a temperatura e comportamento térmico do material.

Nas fichas técnicas de PEUAPM produzidos pela Braskem com o nome comercial de UTEC(ANEXO III) é possível identificar que este material possui faixa de Temperatura de amolecimento Vicat de cerca de 128°C, que é bastante superior às encontradas por Dantas et al. (2019), 56,32°C até 69,02°C para as composições de PVC, e também superior à temperatura de amolecimento de cerca de 70°C encontrada para as Blendas de PVC/NBR pela análise do PQR neste trabalho, o que indicaria que este polímero suportaria temperaturas de trabalho maiores. Sabendo também que nas tubulações industriais os fluidos podem chegar a cerca de 60°C(DANTAS et al. 2019), essa temperatura de serviço se adequaria sem problemas. Pelas mesmas fichas técnicas é possível identificar que o PEUAPM da Braskem possui dureza de cerca de 64 *Shore D*, menor do que as blendas PVC/NBR, sendo que Marçal e Martins(2020) obtiveram uma dureza mínima de 67,94 *Shore D* apenas para a formulação PVC10C30NBR, e maiores para as outras formulações. Como visto nestes estudos, quando um material apresenta menor dureza, pode apresentar melhor compressibilidade. Outra característica importante para a compressibilidade e recuperação, que influenciam significativamente a Selabilidade da junta, seria a Densidade. Sabendo que os PEUAPM da Braskem possuem densidade de cerca de 0.925g/cm<sup>3</sup> (método ASTM D 792), inferior às encontradas para as blendas PVC/NBR, se espera também melhor desempenho, mas contendo problemas com essa propriedade por o PEUAPM ser conhecido como o Polietileno de maior densidade, pode-se considerar a utilização de enchimentos para diminuir ainda mais esta propriedade. Considerando a Resistência a tração do PEUAPM, seu desempenho é próximo aos das blendas PVC/NBR, superior a 305.91kgf/cm<sup>2</sup> (>30MPa), sendo bem satisfatório para suportar as tensões da pressão de fluidos nas ligações flangeadas.

Flitney (2007) afirma que o PEUAPM geralmente possui faixa de temperatura para aplicação como material de vedação entre -250°C até 80°C,

sendo que possui temperatura de amolecimento de cerca de 110°C a 120°C e é principalmente utilizado em ou tubulações criogênicas ou para água ou para alimentos. Ainda de acordo com Flitney (2007), as vedações de materiais plásticos, como o PEUAPM, não devem ser usados em superfícies com um valor de rugosidade acima de 0,25µm Ra ou equivalente. Flitney (2007), além do PEUAPM lista ainda outros principais polímeros utilizados como materiais de vedação, conforme pode ser visto na Figura 51, e como o autor descreve a aplicação dos mais utilizados, listados logo abaixo.

Material	Temperatura de serviço		Temp. Amolecimento (°C) a 1,80MPa	Resistência (MPa)	Fluência (MPa)	Enlogação a fratura (%)	Módulo Elástico (MPa)	Coef. Exp. Térmica ( $\times 10^{-6}$ )
	Min (°C)	Max (°C)						
Polyamide 66	-30	110	60	50		30	2000	100
Polyamide 66/MoS <sub>2</sub>	-30	100	90	85		25	3200	70
Polyamide 33% glass fibre	-50	140	200	170		2.5	8400	20-100
Acetal	-50	100	95	70		50-70	2600	10-120
Acetal/PTFE	-50	100	110	55		15	3000	90
Acetal (30% glass)	-50	120	160	140		15	6000	30
Polyester	-40	120	80	70		5	2500	81
UHMWPE	-250	80	110-120	37-47		300	900	
PPS		220	120	70-120		1-5%	2500-16 500	15-180
PPS 30% carbon fibre		260	260	150-200		0.5-2%	2000-2500	10-16
PTFE (virgin)	-250	175	50	20-35		300	500	100
PTFE glass filled	-200	250	200	30-80		10-100	1400	100
PTFE polymer reinforced	-200	250		14		180	1000	50
PTFE carbon filled	-250	250		30		20	500	30
PTFE bronze filled	-250	250		14		90	1400	60
PEEK	-70	275	175	90		40	4000	25-75
PEEK carbon and graphite filled	-70	275	320	145		2	9500	8-17
PEK				115	45 @ 260	14	4500	
Polyimide (thermoset)		370	not applicable	50-80	30-40 @ 260	2 to 8	2500-4000	25
Polyimide (thermoplastic)		350	300-360	175	46 @ 200	2 to 10	4000	14
Polyimide (carbon filled TP)		290-320	280-330	220		2	11 000	3-900
Polyamide - imide	-200	250	280	190	65 @ 230	15	5000	30
PAI 30% carbon fibre	-200	250	280	200	100 @ 230	6	16 000	9
Polybenzimidazole	-15	400	420	140		3	6500	13
Polybenzimidazole/PEEK	-15	300	310	95		1	13 500	25

Figura 51. Propriedades dos principais polímeros utilizados como elementos de vedação. Fonte: Adaptado(FLITNEY 2007).

### Poliamida (PA):

É rígido e resistente à abrasão, o que o torna útil para resistência ao desgaste, particularmente em condições secas ou com pouca lubrificação. A faixa de temperatura sobre a qual pode ser usado é relativamente limitada. Pode ser reforçado por enchimentos como vidro, para proporcionar maior resistência, e grades preenchidos com MoS<sub>2</sub> também são usados para fornecer melhor lubrificação para trabalho a seco. Uma grande limitação é a alta absorção de água, que leva à instabilidade geométrica. As propriedades mecânicas também mudam

após a exposição ao ar com uma alta umidade relativa. Esse é um problema específico para a fabricação de componentes de vedação. As principais aplicações são para rolamentos e também anéis de reserva em equipamentos que não são expostos a temperaturas extremas ou a uma ampla gama de fluidos.

- Faixa de temperatura:  $-30^{\circ}\text{C}$  a  $100^{\circ}\text{C}$ . (Os enchimentos podem aumentar essa faixa.)
- Resistente a: Ar, óleos minerais e graxas.
- Não é adequado para: Água ou alta umidade relativa, solventes, ácidos.

#### **Acetal (POM):**

Possui melhor estabilidade, menor absorção de água e maior capacidade de temperatura que a poliamida e, portanto, é muito mais amplamente utilizado. Está disponível com uma ampla gama de cargas. A resistência pode ser melhorada por muitos tipos de carga, de vidro a aço inoxidável, e a lubrificação, melhorada pela incorporação de PTFE,  $\text{MoS}_2$  ou carbono. Pode ser visto na Figura 51 que a incorporação de cargas tem efeitos muito significativos nas propriedades mecânicas. A melhor estabilidade combinada com boa resistência a óleos minerais fazem deste material uma escolha popular para anéis de reserva e anéis de rolamentos integrais para aplicações como vedações de cilindro hidráulico.

- Faixa de temperatura:  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $100^{\circ}\text{C}$ .
- Resistente a: Ar, óleos minerais e graxas.
- Não é adequado para: Grande gama de químicos.

#### **Polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM):**

Este material é conhecido por propriedades resistentes ao desgaste e particularmente resistência a meios aquosos. Oferece desempenho superior ao PTFE em aplicações de água e é amplamente utilizado para selos plásticos dinâmicos nessa área. Outra aplicação importante é o componente de rolamento para articulações artificiais. Uma outra aplicação em que este polímero acaba apresentando um bom serviço é em vedações criogênicas, onde é usado para tubulações e juntas de carregamento de gás natural liquefeito que normalmente operam a  $-150^{\circ}\text{C}$ .

- Faixa de temperatura: -250°C a 80°C.
- Resistente a: Água, soluções aquosas, requisitos de implantes humanos, hidrocarbonetos, incluindo aromáticos.
- Não é adequado para: Ésteres, cloro e hidrocarbonetos clorados, substâncias refrigerantes, aminas.

#### **Sulfeto de polifenileno (PPS):**

Seus nomes comerciais são Ryton, Chevron Phillips; Techtron, Fortron. O PPS é um plástico de alta temperatura e alta resistência com uma faixa útil de resistência a fluidos. Embora as capacidades de resistência à temperatura e aos fluidos não sejam tão abrangentes quanto o PTFE, ele possui uma maior resistência e fornece um material útil como alternativa econômica para muitas aplicações, especialmente onde a alta resistência é uma vantagem. É usado para anéis de reserva e também um material de anel em V em aplicações de campos petrolíferos e amplamente utilizado como plástico estrutural de alta temperatura para componentes automotivos, onde a resistência a altas temperaturas é uma vantagem. Cerca de 50% da produção é para componentes automotivos, incluindo sistemas de freio, refrigerante e combustível e no trem de força e na transmissão. É usado para componentes como pistões de plástico, corpos de válvulas e o alojamento de vedações e juntas integrais. Como em outros plásticos e elastômeros resistentes a fluidos, a resistência a fluidos pode ser limitada pelo material de enchimento e, portanto, é importante avaliar as classificações individuais quanto à compatibilidade real.

- Faixa de temperatura: Até 220°C (sem dados confiáveis para baixas temperaturas).
- Resistente à: Água, óleos minerais e sintéticos, líquidos de refrigeração automotivos e fluidos de freio, ácidos aquosos não oxidantes, bases e sais, orgânicos não oxidantes, substâncias refrigerantes a baixa temperatura.
- Não é adequado para: Produtos químicos oxidantes, ácidos fortes, cloro, solventes clorados e substâncias refrigerantes a temperatura elevada.

#### **Politetrafluoretileno (PTFE):**

Outros fluoroplásticos da mesma família podem incluir ETFE, FEP e PFA. PTFE e derivados são provavelmente a classe de plástico mais amplamente utilizada como tecnologia de vedação. O material possui resistência química praticamente universal e um coeficiente de atrito muito baixo, com excelentes propriedades de trabalho a seco. Na forma não preenchida (virgem), também é relativamente suave e, portanto, estará em conformidade com a textura da superfície para fornecer uma vedação de baixo vazamento. É encontrado em vedações dinâmicas e estáticas. Para selos dinâmicos, ele é encontrado em uma variedade de modelos de selos rotativos e alternativos e como material essencial para as embalagens. Como vedação estática, é amplamente utilizado como material de vedação, onde são necessárias resistência ao fluido e também baixa carga de flange. Várias formas de vedação energizada, como anéis U energizados por mola e *O-ring* preenchidos com elastômero, são usados como vedantes estáticos, onde a temperatura ou as condições do fluido estão além dos elastômeros normais. Eles também são particularmente úteis quando é necessário movimento intermitente, como válvulas e juntas rotativas.

O PTFE é encontrado na forma não sinterizada e sinterizada. O material não sinterizado é relativamente macio e deforma facilmente, mas isso o torna útil para embalagens e materiais de vedação de baixo estresse. As vedações geralmente são feitas de PTFE sinterizado antes da usinagem. Materiais como ETFE e FEP foram desenvolvidos para fornecer materiais que podem ser moldados por injeção e são mais prováveis de serem encontrados como componentes de alto volume e, por exemplo, o revestimento em torno de um *O-ring*. Um outro tipo desse material é o expandido, que é fabricado por um processo no qual vazios microscópicos são criados no material, sendo o principal fornecedor a Gore. Isso fornece um material maleável e conformável, especialmente adequado para juntas e gaxetas de baixo estresse. Para fornecer resistência, resistência ao desgaste e resistência à extrusão, uma variedade de cargas é usada. O vidro é muito popular como carga, pois fornece força sem comprometer a resistência do fluido em muitas circunstâncias. O vidro é menos bem-sucedido como enchimento de selos dinâmicos, pois é altamente abrasivo. Uma variedade de cargas é usada e um guia geral delas é fornecido na Figura 52. O tamanho e a geometria da carga

juntamente com o processo de fabricação têm um efeito significativo no desempenho da vedação. O material, a dureza e a textura da superfície da face do contador também são fatores importantes no desempenho da vedação dinâmica. As aplicações para PTFE são encontradas em todos os diversos setores da indústria em que os produtos de vedação são usados. É amplamente utilizado na indústria de processos, onde é necessária resistência química para juntas e gaxetas, em aplicações alimentícias, farmacêuticas e médicas para inércia e em uma ampla gama da indústria em geral para vedações dinâmicas, onde são necessárias características de fricção baixa ou consistente. Também é usado como vedação de eixo rotativo para motores e transmissões automotivas, pois as crescentes demandas de temperaturas mais altas e lubrificantes com novos aditivos estão além das capacidades dos elastômeros convencionais.

- Faixa de temperatura: -250°C a 250°C.
- Resistente a: Maioria das substâncias.
- Não é adequado para: Metais alcalinos fundidos, flúor e outros halogênios, fortes agentes oxidantes. (Com PTFE preenchido, a resistência do fluido será ditada pelo material de enchimento).

Filler material	Temperature range (°C)	Typical applications	Counter-face
None, virgin PTFE	-200 to 200	Static Low pressure, light duties Easily extrudes at temperature Widest fluid resistance	Steel, chromed steel, cast iron, stainless Nickel alloys
Glass	-200 to 260	Rotary, reciprocating at very light duties Static (very abrasive for dynamic) Good fluid resistance	Steel, chromed steel, cast iron, stainless Hardened if any oscillation of seal in groove
Glass fibre/MoS <sub>2</sub>	-200 to 250	Reciprocating Mineral oils, synthetics, phosphate esters, aqueous fluids, chemicals Rotary mineral oils, synthetics, good fluid resistance	Steel, hardened Chromed steel
Graphite	-200 to 230	Reciprocating light duty Aqueous and chemicals Dry gas	Steel, chromed steel, cast iron
Graphite fibre	-200 to 250	Rotary Medium duty, high wear resistance	Steel, hardened
Carbon/graphite	-200 to 260	Rotary, reciprocating Mineral oils, aqueous fluids, steam, dry gas, pneumatics	Steel, chromed steel, stainless
Carbon fibre	-200 to 260	Rotary, reciprocating Mineral oils, aqueous fluids, synthetic fluids and phosphate esters Suitable for soft counter-faces Good extrusion resistance	Steel, chromed steel, cast iron, stainless, aluminium, bronze alloys
Bronze	-150 to 260	Reciprocating Mineral and synthetic oils Phosphate esters High pressures High extrusion resistance	Steel, chromed steel, cast iron
Polymer (usually Ekonol)	-200 to 260	Rotary Mineral, synthetic and aqueous lubricants Dry gas Relatively low abrasion	Steel, chromed steel, cast iron, stainless

Figura 52. Aplicações típicas para o PTFE e seus enchimentos como Material de Vedação. Fonte:(FLITNEY 2007).

### **Poliéteréter-cetona (PEEK):**

Possui os nomes comerciais, Victrex; Arlon, Greene, Tweed. PEEK é notável por ter uma faixa de temperatura de serviço semelhante à do PTFE, mas eles têm uma resistência muito maior e também mantêm suas propriedades mecânicas a altas temperaturas. A temperatura flexível dos materiais cheios pode estar bem acima da temperatura de uso contínuo de 260 °C, mostrada na Figura 49. A resistência química, embora não seja tão abrangente quanto o PTFE, ainda é muito ampla, incluindo boa resistência à hidrólise. Uma grande variedade de classes está disponível com cargas de reforço para aumentar a resistência ou aditivos lubrificantes para fornecer propriedades tribológicas aprimoradas. O PEEK é amplamente utilizado como material de anél de vedação para condições difíceis,

como na indústria de petróleo e gás e aplicações de processos químicos de alta pressão e alta temperatura. Também é usado como material de vedação em anéis U energizados por mola e conjuntos de anéis V para aplicações de alta pressão e temperatura. Também pode ser usado para anéis de pistão, placas de válvulas e aplicações similares onde a estabilidade em altas temperaturas é uma vantagem.

- Faixa de temperatura: -70°C a 260°C.
- Resistente a: Hidrocarbonetos, incluindo lubrificantes, combustíveis e aromáticos, fluidos de éster de fosfato, água e vapor, refrigerantes e solventes halogenados, muitos produtos químicos inorgânicos, cetonas, ésteres, bases e muitos ácidos.
- Não é adequado para: alguns ácidos, incluindo clorídrico, nítrico e sulfúrico, alguns fenóis e compostos de enxofre. A resistência a fluidos pode ser reduzida a temperaturas acima de 200 °C.

#### **Poliamida-imida (PAI):**

Nome comercial Torlon ou Solvay. O Torlon oferece a maior capacidade geral de desempenho de qualquer termoplástico processável por fusão. Possui boa resistência a temperaturas elevadas e é capaz de funcionar sob condições severas de estresse a temperaturas contínuas de até 260°C. As peças usinadas oferecem maior resistência à compressão e maior resistência ao impacto do que a maioria dos outros plásticos de engenharia. Também possui um baixo coeficiente de expansão térmica que, juntamente com a alta resistência à fluência, fornece boa estabilidade dimensional em condições secas. Torlon é um material amorfo com uma temperatura de transição vítrea de 280°C, que ajuda a fornecer as características estáveis do material ao longo da faixa de operação. A alta resistência e o baixo alongamento à ruptura também significam que é adequado apenas para projetos de vedação onde ocorrem deflexões limitadas. A principal área de aplicação de vedações é como faces de vedação mecânica, anéis de pistão e aplicações similares para aplicações com baixa lubrificação ou peso. Também pode ser usado para rolamentos axiais e mancais secos ou parcialmente lubrificados.

- Faixa de temperatura: -200°C a 260°C.

- Resistente a: Óleos, combustíveis e solventes de hidrocarbonetos, incluindo aromáticos, alguns ácidos, incluindo sulfúricos, orgânicos clorados, alguns álcoois e etileno glicol.
- Não é adequado para: Água quente ou condições de umidade quente, metanol, cáustico.

### **Poliimida (PI):**

A poliimida está disponível como material termoplástico e também termofixo. O termofixo oferece os benefícios de maior resistência e estabilidade térmica. Geralmente é fornecido como peças usinadas com acabamento ou componentes prensados para aplicações de maior volume. O material termoplástico é adequado para moldagem por injeção, sendo usado em componentes de alto volume. Uma variedade de classes está disponível com cargas de grafite, carbono ou PTFE para fornecer propriedades aprimoradas de lubrificação. Para aplicações de alta temperatura e alta pressão, as classes termofixas têm o benefício de não terem um ponto de amolecimento. As principais aplicações são anéis de rolamento e pressão, faces de vedação mecânica, anéis de pistão para funcionamento a seco ou em aplicações como transmissões automáticas. O material é muito suscetível à hidrólise e sofre uma perda de propriedades a baixas temperaturas na água. Acima de 100°C, o material terá menos de 50% das propriedades mecânicas originais e podem ocorrer trincas após exposição prolongada.

- Faixa de temperatura: até 280°C. (Alcances de até 350°C ou 400°C são possíveis para termofixos. Não há dados confiáveis sobre propriedades de baixa temperatura).
- Resistente a: Óleos e combustíveis minerais, solventes orgânicos, alguns ácidos, incluindo cloridrato e acético nítrico e diluído e acético, ar e oxigênio.
- Não é adequado para: Água quente e vapor, meios aquosos acima de 100°C, bases, alguns agentes oxidantes, solventes clorados e refrigerantes.

Quanto a consideração de utilização de enchimento no PEAPM, Avanzini (2005), ao estudar PEUAPM com microesferas de cerâmica, PEUAPM com

microesferas de vidro e PA6 (Poliamida 6), comparando a aplicação destes materiais como elementos de vedação a alta-pressão, constatou que o comportamento mecânico sob compressão e tensão dos compósitos de PEUAPM testados não é uniaxial e não é simétrico e, sob carga cíclica na compressão, todos os materiais exibiram histerese e deformação residual na descarga. Foram encontradas evidências de comportamento viscoelástico não linear para os materiais testados, com o PA6 sendo menos sensível ao estresse de relaxamento do que o PEUAPM, podendo indicar menor característica de recuperação da compressibilidade para os PEUAPM. Para avaliar a adequação do material a aplicações de pressão extremamente alta, o grande efeito da pressão hidrostática nas propriedades mecânicas deve ser avaliado, pois o comportamento do polímero pode mudar significativamente quando a pressão aplicada é da mesma ordem de magnitude que o módulo elástico.

Ainda, um estudo interessante de Zhou & Li (2013) comparou multifilamentos de Aramida (utilizada com NBR como materiais de juntas) com multifilamentos de PEUAPM. Sua pesquisa identificou que nos testes de tração, comparado ao multifilamento de aramida, o multifilamento PEUAPM possui maiores resistência à ruptura e alongamento na ruptura e pelo teste de relaxamento de tensão o multifilamento PEUAPM apresentou maior resistência inicial do que o multifilamento de aramida, sendo que o multifilamento PEUAPM apresentou maior módulo inicial. Com o tempo, o multifilamento PEUAPM apresenta a maior taxa de relaxamento, menos força do que a do multifilamento aramida. No processo de alongamento do multifilamento, o multifilamento PEUAPM pode produzir um fluxo viscoso mais irreversível, gerado por escorregamento intermolecular. Portanto, o multifilamento aramida possui melhor elasticidade que o multifilamento PEUAPM.

Quanto a formação de blendas com o PEUAPM, Sakurai et al. (1996) ao estudarem blendas de PEUAPM e borracha EPT (Terpolímero etileno-propileno-dieno) identificaram que o aumento do percentual de borracha diminuiu significativamente a  $T_g$  e a  $T_m$  (Temperatura de fusão) das blendas, limitando a faixa de temperatura de serviço, como ocorreu nos estudos analisados e realizados neste trabalho com o acréscimo do percentual de NBR. No estudo de We et al. (2011), ao utilizarem HDPE-g-MAH (Polietileno de alta densidade grafitado

com anidrido maleico) como compatibilizante para a blenda de PEUAPM e PC(Policarbonato) que é imiscível, conseguiram melhorar a interface entre os polímeros e obter melhoria nas propriedades mecânicas.

Finalmente, embora o UTEC, possa apresentar propriedades interessantes para seu uso como juntas de vedação, é importante que seja feito um estudo focado nas propriedades de aplicação, bem como as estudadas neste trabalho, assim como a utilização de aditivos, cargas, ou formação de blendas devem ser analisadas com o cuidado da manutenção correta das propriedades do produto final. Por um levantamento inicial, o UTEC, ou PEUAPM, pode sim ser uma opção interessante para dar continuidade a esta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13610. Resinas de PVC - Determinação de Valor K**. Rio de Janeiro, Brasil. 1996.
- ALMEIDA, D.V. **Substituição de Estabilizantes a Base de Chumbo pelo de Cálcio-zinco no Processo Produtivo de Tubos de PVC Rígido**. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. São Paulo, Brasil. 2005.
- ANTAKI, G.A. **Piping and Pipeline Engineering - Design, Construction, Maintenance, Integrity, and Repair**. Marcel Dekker Inc. Estados Unidos da América. 2005.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM F 152 - Standard Test Methods for Tension Testing of Nonmetallic Gasket Materials**. Estados Unidos da América. 1995.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM F 36 - Standard Test Method for Compressibility and Recovery of Gasket Materials**. Estados Unidos da América. 2015.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM F 37 - Standard Test Methods for Sealability of Gasket Materials**. Estados Unidos da América. 2006.
- AVANZINI, A. **Mechanical Characterization and Modeling of Polymeric Materials for High-pressure Sealing**. Society for Experimental Mechanics. vol. 45, nº1, p.53-64. 2005.
- BSI STANDARDS PUBLICATION. **BS EN 13555 - Flanges and their Joints - Gasket Parameters and Test Procedures Relevant to the Design Ruler for Gasketed Circular Flange Connections**. Reino Unido. 2014.
- CANEVAROLO S.V.Jr. **Ciência dos Polímeros. Um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 3ªed. Artliber Editora. São Paulo, Brasil. 2010.
- CIESIELSKI A. **An Introduction to Rubber Technology**. Rapra Technology LTD. Reino Unido. 1999.
- COUTINHO, F.M.B. MELLO, I.L. SANTA MARIA, L.C. **Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 13, nº 1, p. 1-13, 2003.
- DANTAS, A. SILVA, I.M.S. SANTANA, T.I.S. ALVES. T.S. SANTOS, V.J. **Estudo de Viabilidade de Uso da Resina PVC para Fabricação de Juntas de Flange para Vedação de Tubulações de Utilidades**. Trabalho de conclusão de curso de

graduação apresentado ao Centro Universitário SENAI CIMATEC como parte das exigências para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais. Centro Universitário SENAI CIMATEC. Bahia, Brasil. 2019.

DROBNY, J.G. **Handbook of Thermoplastic Elastomers**. 2ªed. Elsevier, William Andrew. Estados Unidos da América. 2007.

FINK, J.K. **A Concise Introduction to Additives for Thermoplastic Polymers**. Scrivener Publishing, Wiley. Estados Unidos da América. 2010.

FLITNEY, R. **Seals and Sealing Handbook**. 5ªed. Elsevier, Butterworth-Heinemann. Reino Unido. 2007.

FRIED, J.R. **Polymer Science and Technology**. 3ªed. Prentice Hall, Pearson. Massachusetts, Estados Unidos da América. 2014.

FSA - FLUID SEALING ASSOCIATION, ESA - EUROPEAN SEALING ASSOCIATION. **Gasket Handbook**. 1ªed. FSA - FLUID SEALING ASSOCIATION, ESA - EUROPEAN SEALING ASSOCIATION. Estados Unidos e França. 2017.

GHIYOU, M. BENANIBA M.T. **The Effect of Epoxidized Sunflower Oil on the Miscibility of Plasticized PVC/NBR Blends**. International Journal of Polymeric Materials, v.59, p.463–474. 2010.

GORDON, A.L. **A Critical Review of Physical Test Methods for Gasket Materials**. SAE International. Nova York, Estados Unidos da América. 1968.

INSTITUTO BRASILEIRO DO PVC. **O que é o PVC**. Disponível em: <[pvc.org.br/o-que-e-pvc](http://pvc.org.br/o-que-e-pvc)> Acesso em 29 de Maio de 2020.

LEE, W. HUANG J. **Sealing and Mechanical Behaviors of Expanded PTFE Gasket Sheets Characterized by PVRC Room Temperature Tightness Tests**. Materials Chemistry and Physics. v.68, p.180-196. Estados Unidos da América 2001.

LEMONS GASKET COMPANY. **Gasket Handbook**. LEMONS GASKET COMPANY. Estados Unidos da América. 2016.

MADALENO, E. ROSA, D.S. ZAWADIZKI, S.F. PEDROZO, T.H. RAMOS, L.P. **Estudo do Uso de Plastificantes de Fontes Renovável em Composições de PVC**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol.19, nº4, p.263-270, 2009.

MARÇAL, J.G.V. MARTINS, M.D.M. **Avaliação das Propriedades Térmicas, Morfológicas e de Dureza em Blenda PVC/NBR Aplicado em Juntas Industriais**. Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Centro Universitário SENAI CIMATEC como parte das exigências para a obtenção do título de bacharel

em Engenharia de Materiais. Centro Universitário SENAI CIMATEC. Bahia, Brasil. 2020.

MONTGOMERY, D.C. **Design and Analysis of Experiments**. 9ªed. Wiley. Estados Unidos da América. 2017.

NETO, B.B. SCARMINIO, I.S. BRUNS, R.E. **Como Fazer Experimentos - Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria**. Editora Unicamp. São Paulo, Brasil. 2001.

ONAT A. **The effects of sealing materials on elimination of fugitive emissions**. Materials and Design. v.29, p.533–538, 2008.

PASSADOR, F. R. **Estado de Mistura e Dispersão da Fase Borrachosa em Blendas PVC/NBR**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 16, nº 3, p. 174-181, Brasil. 2006.

PASSADOR, F.R. PESSAN, L.A. RODOLFO Jr., A. **Blendas PVC/NBR por Processamento Reativo II: Caracterização Físico-Mecânica e Morfológica**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 18, nº 2, p. 87-91, 2008.

PATRICK, S.G. **Practical Guide to Polyvinyl Chloride**. Rapra Technology LTD. Reino Unido. 2005.

PEREIRA, J.B.S. **Forças Atuando em Ligação Flangeada**. Disponível em: <[www.petroblog.com.br/wp-content/uploads/For%C3%A7as-atuando-liga%C3%A7%C3%A3o-flangeada.pdf](http://www.petroblog.com.br/wp-content/uploads/For%C3%A7as-atuando-liga%C3%A7%C3%A3o-flangeada.pdf)> . Acesso em 29 de Maio de 2020.

POLYMER PROPERTIES DATABASE. **NBR - Butadiene Nitrile Rubber**. Disponível em: <[polymerdatabase.com/Elastomers/NBR.html](http://polymerdatabase.com/Elastomers/NBR.html)> Acesso em 31 de Maio de 2020.

RABELLO M. **Aditivação de Polímeros**. Artliber Editora Ltda. São Paulo, Brasil. 2000.

RODOLFO Jr, A. NUNES, L.R. ORMANJI, W. **Tecnologia do PVC**. 2ªed. ProEditores, Braskem. São Paulo, Brasil. 2006.

RODOLFO Jr., A. MEI, L.H. I. **Mecanismos de degradação e estabilização térmica do PVC**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 17, no 3, São Carlos. 2007.

RODRIGUES D.P. **Projeto de Juntas de Vedação Não Metálicas para Ligações Flangeadas**. Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil. 2016.

SAKURAI, K. NAKAJO, A. TAKAHASHI, T. TAKAHASHI, S. KAWAZURA, T. MIZOGUCHI, T. **Structure and mechanical properties of UHMWPE/EPT blends and their vulcanizates**. Polymer vol.37 n°17, p. 3953-3957. 1996.

SMITH, F. HASHEMI, J. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais**. 5ªed. AMGH Editora. São Paulo, Brasil. 2012.

SMITH, P. **Piping Materials: Selection and Applications**. Elsevier, Gulf Professional Publishing. Estados Unidos da América. 2005.

STOCKDALE, M.K. **Thermoplastic Elastomers From NBR and Polyvinyl Chloride**. JOURNAL OF VINYL TECHNOLOGY, v. 12, n° 4, p.235-244. 1990.

TELLES, P.C.S. **Tubulações Industriais. Materiais, Projeto, Montagem**. 10ªed. LTC Editora. Rio de Janeiro, Brasil. 2001.

TITOW, W.V. **PVC Technology**. 4ªed. Elsevier Applied Science Publishers. Nova York, Estados Unidos da América. 1986.

VEIGA, J.C. **Juntas Industriais**. 7ªed. Teadit. Rio de Janeiro, Brasil. 2014.

WANG, M. GUO, L. SUN, H. **Encyclopedia of Biomedical Engineering: Manufacturing Technologies for Biomaterials**. Elsevier. Estados Unidos da América. 2018.

WEI, X. LU, Y. HUANG, L. **Mechanical Properties and Morphology of UHMWPE/PC/HDPE-g-MAH Blends**. Polymer-Plastics Technology and Engineering, vol.50, n°5, p.190–195. 2011.

WHITE, J.R. DE, S.K. **Rubber Technologist's Handbook**. Rapra Technology LTD. Reino Unido. 2001.

WIMOLMALA, E. WOOTHIKANOKKHAN, J. SOMBATSOMPOP, N. **Effects of Composition and Temperature on Extrudate Characteristics, Morphology, and Tensile Properties of Acrylic Rubber–Blended PVC**. Journal of Applied Polymer Science v.80, p.2523 - 2534. 2001.

ZHOU, L. LI, X. **A Comparative study of UHMWPE Multifilament and Aramid Multifilament**. Advanced Materials Research Vol. 709, p,84-88. 2013.

## ANEXO I

## DATASHEET DAS BLENDS DE PVC/NBR



DATASHEET  
Revisão 01 (Jul/2020)

## PVCCNBR

**Descrição:** A classe PVCCNBR são compostos de PVC, com variação de teores de carga mineral ( $\text{CaCO}_3$ ) e Borracha Nitrilica (NBR), além de antioxidante, estabilizante térmico, lubrificante e pigmento. O processo de fabricação se dá por calandragem e prensagem, permite obter um produto com alta recuperação e boa resistência mecânica. Em diferentes espessuras apresenta valores diferentes para as Características de Compressibilidade, Recuperação, Resistência à Tração e Relaxamento *Creep*(PQR),o que deve ser atentado em sua seleção.

Condições de fornecimento	Placas de 250 mm x 250 mm
	Espessuras de 1,6 e 3,2 mm
Cor	Preta
Norma atendida	ASTM F104 (F991000)



Ilustração do material fornecido

## Dados para Espessura de 1,6mm:

Propriedades típicas (placas de 1,6mm)	PVC40C30NBR	PVC10C30NBR	PVC40C30NBR	PVC10C10NBR	
Temperatura de transição vítrea (°C)	54,60	60,81	57,64	57,17	
Temperatura de início de degradação (°C)	230,60	231,70	230,34	229,55	
Densidade ( $\text{g/cm}^3$ ) ISO 1183-1	1,42	1,30	1,49	1,37	
Dureza (Shore D) ASTM D2240	70,59	67,94	79,19	77,16	
Compressibilidade à 5000 psi (%) ASTM F36	7,95	7,76	2,24	1,96	
Recuperação à 5000 psi (%) ASTM F36	69,57	76,16	82,08	92,82	
Resistência à tração (MPa) ASTM 152	Paralela	26,56	27,07	36,76	42,29
	Transversal	25,70	28,06	34,40	43,53
Relaxamento (PQR) DIN EN 13555	0,07	0,08	0,03	0,04	

**Dados para Espessura de 3,2mm:**

<b>Propriedades típicas (placas de 3,2mm)</b>	<b>PVC40C30NBR</b>	<b>PVC10C30NBR</b>	<b>PVC40C30NBR</b>	<b>PVC10C10NBR</b>
Temperatura de transição vítrea (°C)	54,60	60,81	57,64	57,17
Temperatura de início de degradação (°C)	230,60	231,70	230,34	229,55
Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) ISO 1183-1	1,42	1,30	1,49	1,37
Dureza (Shore D) ASTM D2240	70,59	67,94	79,19	77,16
Compressibilidade à 5000 psi (%) ASTM F36	8,12	8,57	7,45	3,45
Recuperação à 5000 psi (%) ASTM F36	64,64	73,32	69,13	78,19
Resistência à tração (MPa) ASTM 152	20,40	22,34	33,65	41,31
Transversal				
Relaxamento (PQR) DIN EN 13555	0,04	0,03	0,05	0

## ANEXO II

## DATASHEET DA JUNTA DE REFERÊNCIA DA TEADIT



### Descrição:

O NA1002 é um papelão hidráulico de uso universal contendo fibra de aramida, cargas reforçantes e outros materiais estáveis a elevadas temperaturas ligados com borracha NBR. O processo de fabricação por meio de calandragem, sob alta pressão e temperatura, aliado a um rigoroso controle de qualidade permite obter um produto com excelente selabilidade e resistência química.

Norma atendida: ASTM F104 - F712120E22M5

Cor: verde

### Aplicações:

É um produto de uso universal indicado, principalmente, para derivados de petróleo, solventes, água, vapor saturado e produtos químicos em geral, com a melhor relação custo/benefício, encontrada em produtos da família dos papelões hidráulicos.

### Propriedades Físicas Típicas:

Densidade - ASTM F1315 - g/cm <sup>3</sup>	1,75
Compressibilidade - ASTM F36J - %	7-17
Recuperação - ASTM F36J - % mínimo	45
Resistência à Tração - ASTM F152 - MPa	11,5
Perda ao Fogo - ASTM F495 - % máximo	34
<b>Aumento de Espessura - ASTM F146 - % máximo</b>	
ASTM óleo IRM 903, 5h a 150°C	12
Fuel B, 5h a 25°C	10
<b>Aumento de Peso - ASTM F146 - % máximo</b>	
ASTM óleo IRM 903, 5h a 150°C	15
Fuel B, 5h a 25°C	15
Creep - ASTM F38 - %	25
Retenção de Torque - DIN 52913 - N/mm <sup>2</sup>	28
Selabilidade a 1000psi - ASTM F37A - ml/h	0,25

Testes ASTM são baseados em folhas com espessura de 0,8 mm e testes DIN em folhas com espessura de 2,0 mm.

### Fatores "m" e "y"<sup>(1)</sup>

Espessura (mm)	"m"	"y" (psi)
1.6	2,0	3.500
3.2	2,0	3.500

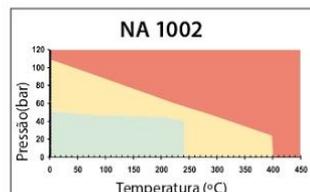
<sup>(1)</sup> Os fatores de aperto "m" e de esmagamento mínimo "y" de um material de vedação são os fatores a serem considerados quando do cálculo de torque de uma junta de vedação. São parâmetros determinados experimentalmente por análise de resultados laboratoriais relativos às características inerentes a cada material específico e segundo os critérios obedecidos pelo fabricante. O apêndice 2 do Capítulo VIII Divisão 1 do Código ASME estabelece parâmetros para o projeto de juntas, com valores genéricos das características "m" (fator de aperto, que é sempre uma constante adimensional) e "y" (valor de esmagamento mínimo) da junta.

Os parâmetros de aplicação indicados neste folheto são típicos. Para cada aplicação específica deverá ser realizado um estudo independente e uma avaliação de compatibilidade. Consulte-nos a respeito de recomendações para aplicações específicas. Um equívoco na seleção do produto mais adequado ou na sua aplicação pode resultar em danos materiais e/ou em sérios riscos pessoais, sendo que a Teadit não se responsabiliza pelo uso inadequado das informações constantes do presente folheto, nem por imprudência, negligência ou imperícia na sua utilização, colocando seus técnicos à disposição dos consumidores para esclarecer dúvidas e fornecer orientações adequadas em relação a aplicações específicas. Estas especificações estão sujeitas a mudanças sem prévio aviso, sendo que esta edição substitui todas as anteriores.



### Limites de Serviços:

Temperatura em uso contínuo	240°C
Temperatura máxima	400°C
Pressão em uso contínuo	50 bar
Pressão máxima	110 bar



- 🟢 Área compatível para aplicação
- 🟡 Consultar a Engenharia de Produtos Teadit
- 🔴 Deve ser feita uma análise técnica mais detalhada

### Fornecimento:

Fornecido em placas 1.500 mm x 1.600 mm ou 1.500 mm x 3.200 mm, nas espessuras de 0,4 mm a 6,4 mm. Outras espessuras sob consulta.

R.281119

Teadit Indústria e Comércio Ltda.

Av. Pastor Martin Luther King Jr., 8939 - Rio de Janeiro - CEP: 21530-012

comercial@teadit.com.br

+55 (19) 3765-6501

www.teadit.com/br

## ANEXO III

## DATASHEETS DOS UTECS DE REFERÊNCIA DA BRASKEM



Datasheet  
Revisão 8 (Aug / 18)

## Ultra High Molecular Weight Polyethylene UTEC3040

**Description:**

Description:

UTEC3040 is an Ultra High Molecular Weight Polyethylene with a molecular weight about 10 times higher than High Density Polyethylene (HDPE) resins. This extremely high molecular weight yields several unique properties to this polymer such as high abrasion resistance and impact strength and low coefficient of friction, what makes it a self-lubricating material.

**Applications:**

Applications which require highest wear resistance, Technical and porous parts, filters, compression molded sheets

**Physical Properties**

Characteristics	Method	Units	Values
Intrinsic Viscosity	ASTM D 4020	dL/g	14
Average Molecular Weight	Internal	g/mol	3.0x10 <sup>6</sup>
Density	ASTM D 792	g/cm <sup>3</sup>	0.925
Bulk Density	ASTM D 1895	g/cm <sup>3</sup>	0.45
Average Particle Size Dp50	ASTM D 1921	µm	190

**Mechanical Properties**

Characteristics	Method	Units	Values
Tensile Strength at Yield	ASTM D 638 ISO 527	MPa	= 17
Tensile Strength at Break	ASTM D 638 ISO 527	MPa	> 30
Ultimate Elongation	ASTM D 638 ISO 527	%	> 350 > 400
Notched Izod Impact Strength	ASTM D 256	J/m	No break
Charpy Impact Strength*	ISO 11542-2	KJ/m <sup>2</sup>	> 180
Abrasion Index (reference ISO 15527 = 100)	Sand slurry - Internal	-	100
Abrasion Index (reference Stainless Steel SAE1020 = 100)	Sand slurry - Internal	-	25
Static Friction Coefficient	ASTM D 1894	-	0.10
Kinetic Friction Coefficient	ASTM D 1894	-	0.09
Shore D Hardness	ASTM D 2240 ISO 868	-	64
Shore D Hardness (15 sec)	ASTM D 2240 ISO 868	-	57

\* Determined with double-notched specimens (14° v-notch on both sides) in accordance with ISO 11542-2.

**Thermal Properties**

Characteristics	Method	Units	Values
Melt Temperature	ASTM D 3418	°C	133
Vicat Softening Temperature at 1Kg	ASTM D 1525 ISO 306	°C	128
Heat Deflection Temperature	ASTM D 648	-	-
-- @ 0.45 N/mm <sup>2</sup>	-	°C	79
-- @ 1.81 N/mm <sup>2</sup>	-	°C	48
Thermal Conductivity @ 23°C	ASTM D 177	W/m.K	0.4

Coefficient of Linear Expansion (between -30°C and 100°C)	ASTM D 696	10 <sup>-4</sup> /°C	1.5
Specific Heat @ 23°C	ASTM E 1269	cal/g°C	0.48
Specific Melt Enthalpy	ASTM D 3418	cal/g	34

#### Electrical Properties

Characteristics	Method	Units	Values
Volume Resistivity	ASTM D 257	ohm.cm	> 10 <sup>14</sup>
Surface Resistivity	ASTM D 257	ohm	> 10 <sup>12</sup>
Dielectric Strength	ASTM D 149	kV/cm	900
Dielectric Constant @ 1KHz	ASTM D 150	-	2.3

#### Other Properties

Characteristics	Method	Units	Values
Water Absorption	ASTM D 570	%	0.01

#### Final Remarks (UTEC):

1. This resin meets the requirements for olefin polymers as defined in 21 CFR, section 177.1520 issued by FDA - Food and Drug Administration in force on the date of publication of this specification. The additives present are covered in appropriate regulation by FDA.
2. The information presented in this Data Sheet reflects typical values obtained in our laboratories, but should not be considered as absolute or as warranted values. Only the properties and values mentioned on the Certificate of Quality are considered as guarantee of the product.
3. In some applications, Braskem has developed tailor-made resins to reach specific requirements.
4. In case of doubt regarding utilization, or for other applications, please contact our Technical Assistance.
5. For information about safety, handling, individual protection, first aids and waste disposal, please see MSDS. CAS Registry number: 9002-88-4.
6. The mentioned values in this report can be changed at any moment without Braskem previous communication.
7. Braskem does not recommend this grade for packages, parts or any kind of product manufacture that will be used for storage or contact with solution that will have internal contact with human body.
8. The content of this Data Sheet replaces previous revisions published for this product.
9. This resin does not contain the substance Bisphenol A (BPA, CAS # No. 80-05-7) in its composition.


**Datasheet**

Review 2 (Aug / 18)

### Ultra High Molecular Weight Polyethylene UTEC6540

**Description:**

UTEC6540 is an Ultra High Molecular Weight Polyethylene with a molecular weight about 10 times higher than High Density Polyethylene (HDPE) resins. This extremely high molecular weight yields several unique properties to this polymer such as high abrasion resistance and impact strength and low coefficient of friction, what makes it a self-lubricating material.

**Applications:**

Applications which require highest wear resistance, Technical parts RAM extruded and compression molded sheets, rods and profiles.

**Physical Properties**

Characteristics	Method	Units	Values
Intrinsic Viscosity	ASTM D 4020	dL/g	28
Average Molecular Weight	Internal	g/mol	8.0x10 <sup>6</sup>
Density	ASTM D 792	g/cm <sup>3</sup>	0.925
Bulk Density	ASTM D 1895	g/cm <sup>3</sup>	0.45
Average Particle Size Dp50	ASTM D 1921	µm	190

**Mechanical Properties**

Characteristics	Method	Units	Values
Tensile Strength at Yield	ASTM D 638 ISO 527	MPa	= 17
Tensile Strength at Break	ASTM D 638 ISO 527	MPa	> 30
Ultimate Elongation	ASTM D 638 ISO 527	%	> 300 > 350
Notched Izod Impact Strength	ASTM D 256	J/m	No break
Charpy Impact Strength*	ISO 11542-2	KJ/m <sup>2</sup>	> 100
Abrasion Index (reference ISO 15527 = 100)	Sand slurry - Internal	-	76
Abrasion Index (reference Stainless Steel SAE1020 = 100)	Sand slurry - Internal	-	20
Static Friction Coefficient	ASTM D 1894	-	0.10
Kinetic Friction Coefficient	ASTM D 1894	-	0.09
Shore D Hardness	ASTM D 2240 ISO 868	-	64
Shore D Hardness (15 sec)	ASTM D 2240 ISO 868	-	59

\* Determined with double-notched specimens (14° v-notch on both sides) in accordance with ISO 11542-2.

**Thermal Properties**

Characteristics	Method	Units	Values
Melt Temperature	ASTM D 3418	°C	133
Vicat Softening Temperature at 1Kg	ASTM D 1525 ISO 306	°C	128
Heat Deflection Temperature	ASTM D 648	-	-
-- @ 0.45 N/mm <sup>2</sup>	-	°C	79
-- @ 1.81 N/mm <sup>2</sup>	-	°C	48
Thermal Conductivity @ 23°C	ASTM D 177	W/m.K	0.4
Coefficient of Linear Expansion (between -30°C and 100°C)	ASTM D 696	10 <sup>-4</sup> /°C	1.5

Specific Heat @ 23°C	ASTM E 1269	cal/g°C	0.48
Specific Melt Enthalpy	ASTM D 3418	cal/g	34

#### Electrical Properties

Characteristics	Method	Units	Values
Volume Resistivity	ASTM D 257	ohm.cm	$> 10^{14}$
Surface Resistivity	ASTM D 257	ohm	$> 10^{12}$
Dielectric Strength	ASTM D 149	kV/cm	900
Dielectric Constant @ 1KHz	ASTM D 150	-	2.3

#### Other Properties

Characteristics	Method	Units	Values
Water Absorption	ASTM D 570	%	0.01

#### Final Remarks (UTEC):

1. This resin meets the requirements for olefin polymers as defined in 21 CFR, section 177.1520 issued by FDA - Food and Drug Administration in force on the date of publication of this specification. The additives present are covered in appropriate regulation by FDA.
2. The information presented in this Data Sheet reflects typical values obtained in our laboratories, but should not be considered as absolute or as warranted values. Only the properties and values mentioned on the Certificate of Quality are considered as guarantee of the product.
3. In some applications, Braskem has developed tailor-made resins to reach specific requirements.
4. In case of doubt regarding utilization, or for other applications, please contact our Technical Assistance.
5. For information about safety, handling, individual protection, first aids and waste disposal, please see MSDS. CAS Registry number: 9002-88-4.
6. The mentioned values in this report can be changed at any moment without Braskem previous communication.
7. Braskem does not recommend this grade for packages, parts or any kind of product manufacture that will be used for storage or contact with solution that will have internal contact with human body.
8. The content of this Data Sheet replaces previous revisions published for this product.
9. This resin does not contain the substance Bisphenol A (BPA, CAS # No. 80-05-7) in its composition.