

DEFESA DA DISSERTAÇÃO DO PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM  
MATERIAIS

# DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM COMPÓSITO DE POLIPROPILENO (PP) COM ADIÇÃO DE POLIESTIRENO DE ALTO IMPACTO (HIPS) E REFORÇO DE PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA

---

ALUNA: GABRIELA DE CASTRO ROLIM

ORIENTADOR: PROF. DR. BRUNO CHABOLI GAMBARATO

VOLTA REDONDA, 2020

# Sumário

---

- Introdução
- Objetivos
- Justificativa
- Revisão Bibliográfica
- Materiais e métodos
- Resultados e Discussões
- Conclusões
- Sugestões para trabalhos futuros

# Introdução - Sustentabilidade

- Aumento populacional x Crescimento industrial
- Aumento da geração de resíduos
- Falta de descarte consciente
- Criação de novos materiais



# Objetivos

---

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver e caracterizar materiais compósitos de matriz polimérica com reforço de materiais metálicos. Para a matriz, foi escolhido o polipropileno (PP) adicionado de poliestireno de alto impacto (HIPS) e, como reforço, o pó de aciaria elétrica (PAE).

- Objetivos Específicos
  - Processar compósitos com diferentes teores de PP, PAE e HIPS;
  - Caracterizar as propriedades mecânicas dos compósitos obtidos;
  - Avaliar a influência da composição dos materiais sobre as propriedades mecânicas;
  - Avaliar se a adição de HIPS promove efeito combinado sobre as propriedades mecânicas.

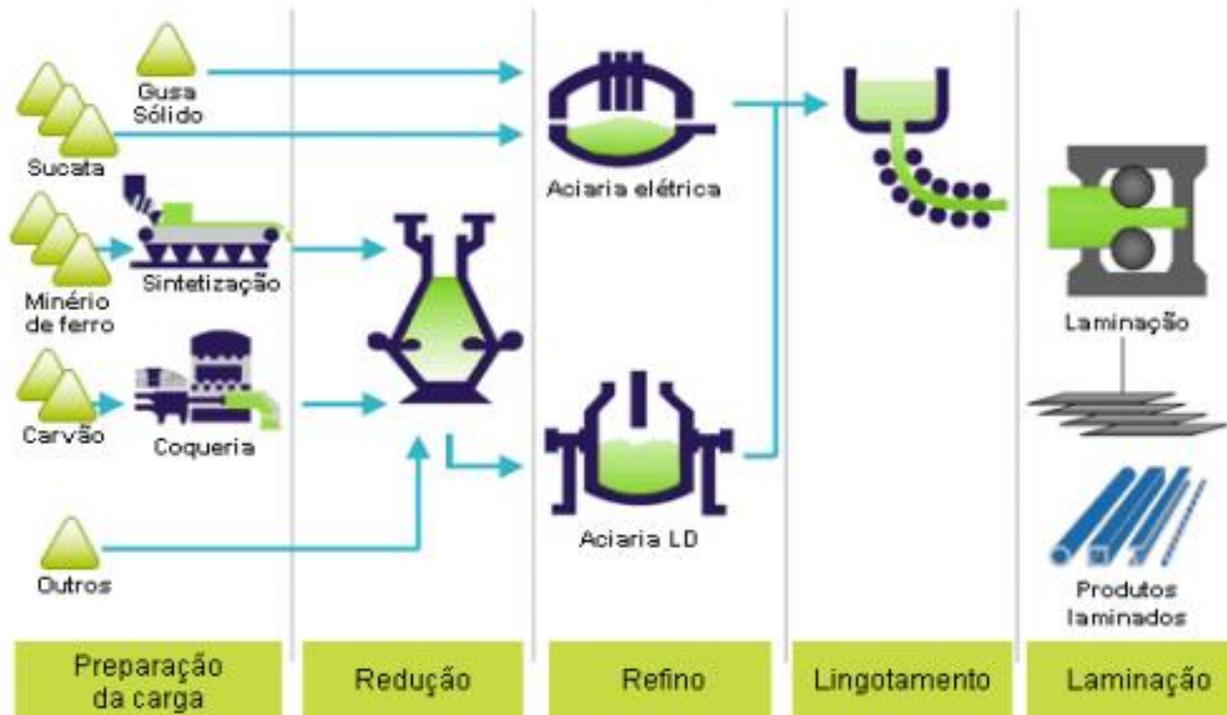
# Justificativa

---

- Reciclagem de rejeitos obtidos da indústria siderúrgica e da indústria de polímeros.
- Composição do PAE – Classificado como resíduos classe I – resíduo perigoso (norma NBR 100004:2004).
- Descarte de PP em aterros.
- Somente 26% de todo o polipropileno produzido no país é reciclado.
- Estudo para viabilizar o processamento dos materiais em termos de propriedades mecânicas e produção de um compósito.

# Processos Siderúrgicos

- Siderurgia.
- Metalurgia.
- Usinas semi-integradas e usinas integradas



FONTE: IABR(2008).

# Processos Siderúrgicos

- Aço do dia-a-dia.
- Em 2016 foram produzidos 31,3 milhões de toneladas de aço bruto no Brasil.
- Reciclagem do aço.



FONTE: IABR(2008).

# Resíduos do processo siderúrgico

- Podem ser classificados como co-produto ou subproduto.
- Três destinos comuns: o descarte, o reaproveitamento dentro da própria empresa ou, ainda, o reaproveitamento externo.
- A geração de resíduos sólidos é em torno de 43,5% da produção total do aço bruto, assim em 2016 no Brasil gerou certa de 13,61 milhões.

PREPARAÇÃO DE CARGA	REDUÇÃO	REFINO	LINGOTAMENTO	LAMINAÇÃO
<b>RESÍDUOS SÓLIDOS</b>				
FINOS DE MINÉRIO DE FERRO	ESCÓRIA	ESCÓRIA	SUCATA	SUCATA
FINOS DE CARVÃO	FINOS DE MINÉRIO DE FERRO	PÓ	CAREPA	CAREPA
PÓ	FINOS DE CARVÃO	LAMA		
LAMA	PÓ	REFRATÁRIOS		
	LAMA			
	REFRATÁRIOS			

FONTE: Adaptado de Santos, et. al. IBS (2006).

# Pó de aciaria elétrica (PAE)

- Segundo a ABNT NBR 10004/04, é classificado como resíduo perigoso de fonte específica (K061).
- Coletado através de filtros de mangas ou precipitadores eletrostáticos.

	Mundo		Brasil
	kg.t <sup>-1</sup> gusa ou aço	10 <sup>6</sup> t.ano <sup>-1</sup>	10 <sup>6</sup> t.ano <sup>-1</sup>
Recicláveis	43	30	1,2
Poeira de alto-forno	1 a 2 ***	0,5 a 1,0	0,2 a 0,04
Lama de alto-forno	< 1 ***	~ 0,2	~ 0,001
Finos de coque	-	-	-
Lama grossa de conversor	5-6	2,5	0,1
Lama fina de conversor	17	8	0,34
Carepas	10-20	7	0,3
Poeira aciaria elétrica	15	4,6	0,07
Escória de alto-forno	150 a 350 (300)	140	6,0
Escória de conversor	100	47 *	2,0 **
Escória lingotamento contínuo	30-35	17 *	0,7 **
Escória aciaria elétrica	15	5 *	0,075

\*60% aço por conversor e 40% por aciaria elétrica

\*\*80 e 20% respectivamente

\*\*\*Pós e lamas para produção de gusa = 16,9 kg.t<sup>-1</sup> e para aciaria = 16 kg.t<sup>-1</sup>

FONTE: Adaptado de Takano, et. al. (2000).

# Pó de aciaria elétrica (PAE)

- Constituído de elementos provenientes da injeção dos finos de coque, do escorificante, do ferro-gusa, de ferro-ligas, do refratário e da sucata.
- Normalmente classificado pelo teor de Zinco.
- Geração do PAE é em torno de 1,5% do aço produzido, em 2016 gerou-se então 81,4 mil toneladas.
- Custo para disposição em aterro é de R\$ 300,00 por tonelada. Em 2016 o custo anual foi de R\$ 24.420.000,00 aproximadamente.

<b>Componente químico</b>	<b>Porcentagem na composição (%)</b>
Óxidos de Ferro	49
Óxidos de Zinco	16
Óxidos de Cálcio	12
Óxidos de Silício	5
Óxidos de Manganês	3
Óxidos de Magnésio	2
Óxidos de Chumbo	2
Alumina	1,5

FONTE: Brehm (2004).

# Polímeros

- Macromoléculas formadas pela repetição de muitos meros.
- Classificados como termoplásticos e termorrígidos.

Tipos	Aplicações
<b>TERMOPLÁSTICOS</b>	
PET – Polietileno Tereftalato	Frascos de refrigerantes, produtos farmacêuticos, produtos de limpeza, mantas de impermeabilização e fibras têxteis.
PEAD – Polietileno de Alta Densidade	Embalagens para cosméticos, produtos químicos e de limpeza, tubos para líquidos e gás, tanques de combustível para veículos automotivos.
PVC – Policloreto de Vinila	Frascos de água mineral, tubos e conexões, calçados, encapamento de cabos elétricos, equipamentos médicos-cirúrgicos, esquadrias e revestimentos.
PEBD – Polietileno de Baixa Densidade	Embalagens de alimentos, sacos industriais, sacos para lixos, lonas agrícolas, filmes flexíveis para embalagens e rótulos de briquendos
PP – Polipropileno	Embalagens de massas e biscoitos, potes de margarina e seringas descartáveis, equipamentos médicos-cirúrgicos, fibras e fios têxteis, utilidades domésticas e autopeças.
PS – Poliestireno	Copos descartáveis, placas isolantes, aparelhos de som e TV, embalagem de alimentos, revestimento de geladeira e material escolar.
Outros	Plásticos especiais e de engenharia, CDs, eletrodomésticos e corpos de computadores
<b>TERMORRÍGIDOS</b>	
PU – Poliuretano EVA de Vinil – Poliacetato Etileno	Solados de calçados, interruptores, peças industriais elétricas, peças para banheiros, pratos, travessas, cinzeiros, telefones e etc.

FONTE: Adaptado Roda (2013).

# Polipropileno (PP)

- Alta versatilidade de processamento, ótimas propriedades mecânicas e baixo custo.
- Obtido pelo gás propileno ( $C_3H_6$ ) através de um processo de poliadição.
- Os monômeros se combinam através de uma ligação covalente.
- Para se prever o comportamento mecânico de um polímero é necessário considerar três variáveis: Estrutura, tempo de solicitação do esforço e temperatura.

<b>Propriedades</b>	<b>Valor</b>
Densidade ( $g.cm^{-3}$ )	0,89 – 0,93
Índice de fluidez (Viscosidade) ( $g.10min^{-1}$ )	0,27 – 50
Tensão de ruptura (MPa)	25 – 40
Alongamento na ruptura (%)	1,5 – 600
Dureza Rockwell (HR)	80 – 110
Resistência ao Impacto: Notch Izod ( $J.m^{-1}$ )	5,3 – 100
% absorção de água . 24 h <sup>-1</sup>	0,01 – 0,03
Resistência a tração no escoamento (MPa)	35
Temperatura de deflexão térmica em °C	98

FONTE:  
Braskem (2014).

# Reciclagem do polipropileno

---

- Passos para reciclagem:
  - Separação de material de acordo com sua utilização;
  - Moagem e lavagem do material;
  - Exposição do material a altas temperaturas para seu derretimento;
  - Possibilidade de uso de corantes no material;
  - Injeção do mesmo em moldes.
- Quatro categorias de reciclagem:
  - Pré-consumo ou primária;
  - Pós-consumo ou secundária;
  - Química ou terciária;
  - Energética ou quartenária.

# Poliestireno de Alto Impacto (HIPS)

---

- Matriz rígida e contínua com poliestireno (PS) grafitizado e domínios elastoméricos dispersos e que são comumente compostos por polibutadieno (PB).
- Alta resistência ao impacto, um aumento do alongamento até a ruptura e alta resistência à fratura.
- Material adequado para diversas aplicações.

# Revisão bibliográfica – Compósitos

- Compostos pela matriz e por um reforço
- Classificados pelo reforço.



FONTE: Adaptado de LEVY NETO & PARDINI (2006).

# Desenvolvimento de compósitos

---

- Aplicações em indústrias como aeronáutica, aeroespacial, de transportes, de material bélico, de material esportivo.
- Materiais a serem utilizados como matriz e reforço precisam de algum tipo de preparação.
- Ensaio típicos para caracterização quanto as propriedades físicas, químicas, morfológicas, térmicas e mecânicas:
  - Raio-X;
  - Microscópios ópticos e de varredura;
  - Termogravimetria;
  - Calorimetria exploratória diferencial (DSC);
  - Tração;
  - Dureza;
  - Flexão.

# Materiais e métodos

## Obtenção dos materiais

PP

HIPS

PAE

## Processamento dos materiais nas composições adequadas

Material dividido em 9 composições, sendo 200 g de cada.

## Injeção dos materiais em corpos de prova

Materiais injetados de acordo com as normas ASTM D 638-03 e ASTM D 790-03.

## Caracterização do material

Ensaio de Tração

Ensaio de Flexão

Ensaio de Dureza

FONTE: Autora (2020).

# Materiais

---

- Polímeros:
  - Resíduo doméstico de polipropileno;
    - Higienizado;
    - Triturado;
    - Armazenado.
  - Poliestireno de alto impacto virgem.
- Resíduo da indústria siderúrgica
  - Pó de aciaria elétrica coletado em um filtro de uma siderúrgica.
    - Peneirado em 60 Mesh;
    - Armazenado.

# Métodos – Preparação do compósito

- Proporções do material.

Amostras	Quantidade (%)		
	PAE	PP	HIPS
PP <sub>90</sub> PAE <sub>0</sub> HIPS <sub>10</sub>	0	90	10
PP <sub>80</sub> PAE <sub>0</sub> HIPS <sub>20</sub>	0	80	20
PP <sub>90</sub> PAE <sub>10</sub> HIPS <sub>0</sub>	10	90	0
PP <sub>80</sub> PAE <sub>10</sub> HIPS <sub>10</sub>	10	80	10
PP <sub>70</sub> PAE <sub>10</sub> HIPS <sub>20</sub>	10	70	20
PP <sub>80</sub> PAE <sub>20</sub> HIPS <sub>0</sub>	20	80	0
PP <sub>70</sub> PAE <sub>20</sub> HIPS <sub>10</sub>	20	70	10
PP <sub>60</sub> PAE <sub>20</sub> HIPS <sub>20</sub>	20	60	20

FONTE: Autora (2020).

# Métodos – Preparação do compósito

- Misturador homogeneizador de plásticos “Dryser” da MH Equipamentos, modelo MH-50H.
- Moinho de facas da marca Plastimax.



FONTE: Autora (2020).



FONTE: Autora (2020).

# Métodos – Preparação do compósito

- O material foi injetado a 300°C em uma injetora da marca RAY RAM, modelo TSMP.



FONTE: Autora (2020).

# Métodos – Caracterização do compósito

- Os ensaios de tração e flexão foram realizados na Máquina Universal de tração, da marca EMIC DL-10000 em temperatura ambiente.
  - Para o ensaio de tração usou-se uma célula de carga 5 kN à uma velocidade de 5 mm.min<sup>-1</sup>, foram utilizados 5 corpos de prova para cada compósito e comprimento inicial do CP de  $L_0 = 60$  mm.
  - Para o ensaio de flexão foram utilizados 5 corpos de prova para cada compósito, com células de carga de 100 kN, velocidade de ensaio de 5mm.min<sup>-1</sup>, com uma distância de apoios de 80 mm.



FONTE: Autora (2020).

# Métodos – Caracterização do compósito

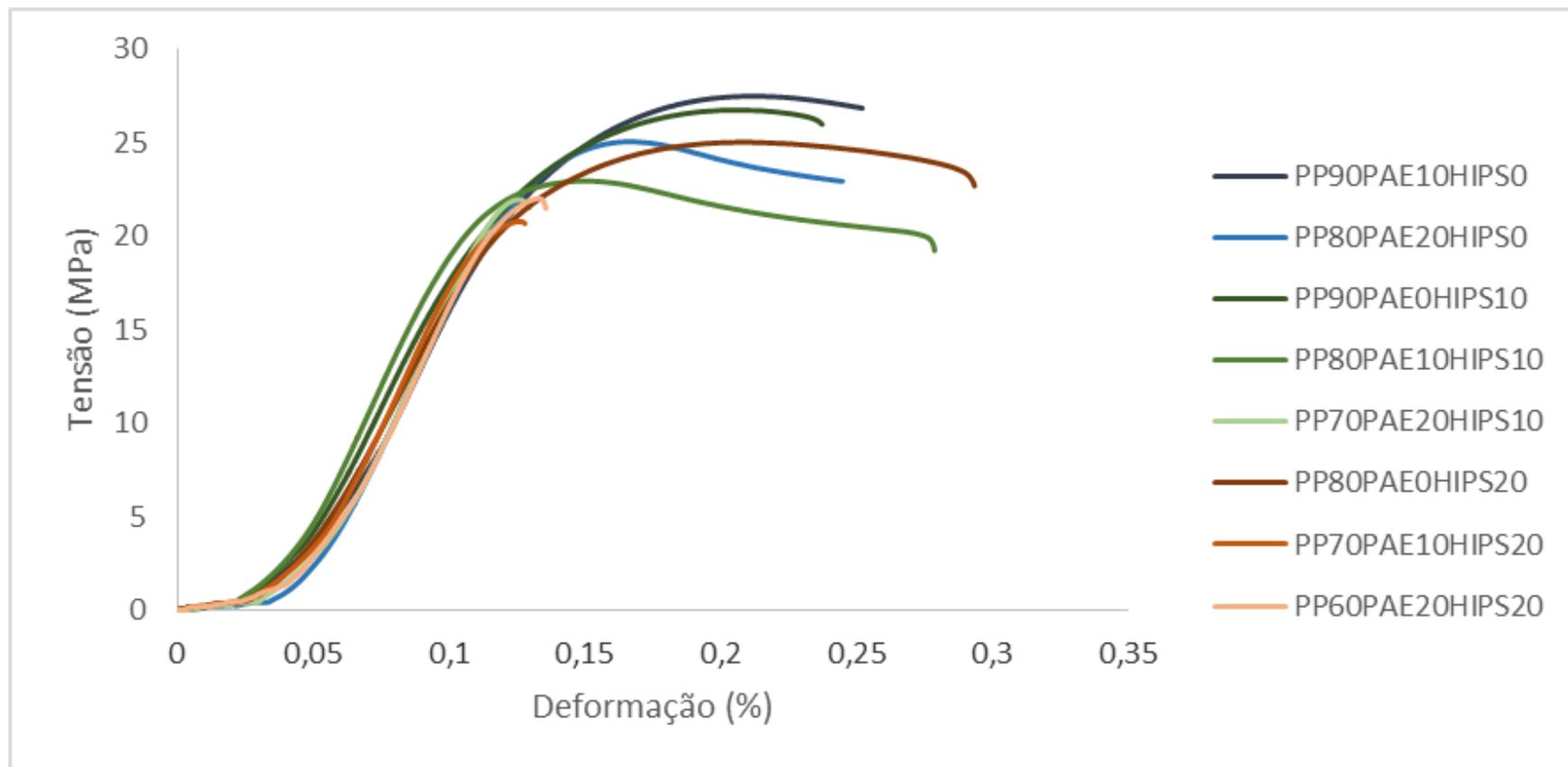
---

- Ensaio de dureza Shore D
  - Foi utilizado o durômetro Portátil Digital – Shore D;
  - As normas aplicadas para o ensaio são as ISO 7619, ISO 868, STM D 2240-01 e JIS K6253, com uma resolução de 0,1 Shore D e exatidão e torno de 1 Shore D.
  - A norma utilizada para o corpo de prova foi a ASTM D-790-03.



FONTE: Autora (2020).

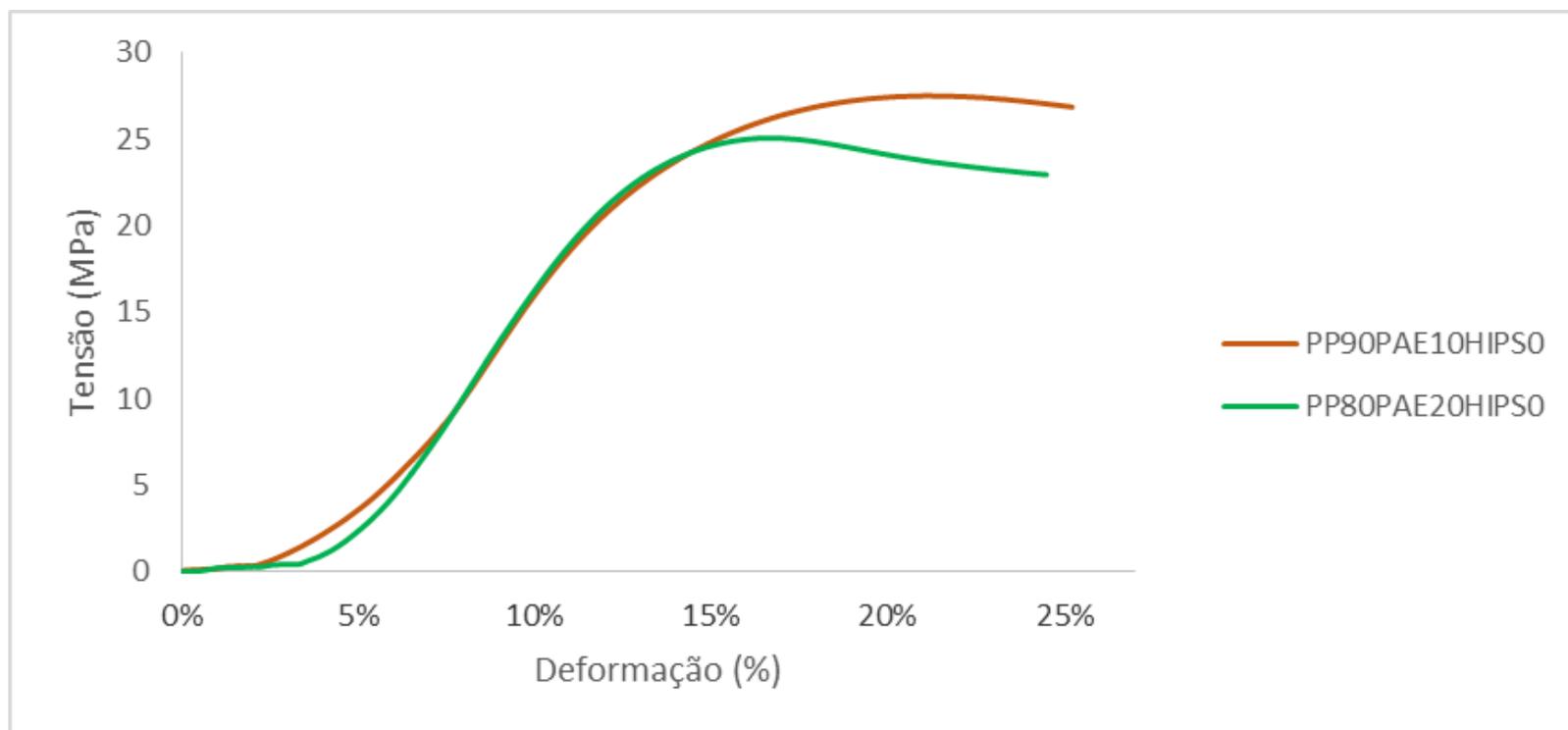
# Resultados e discussões - Tração



FONTE: Autora (2020).

# Resultados e discussões - Tração

- O aumento do PAE influenciou a tenacidade do material, visto que a área abaixo da curva diminuiu, pode-se inferir que o compósito com 20% de PAE é menos tenaz que material com 10%.



FONTE: Autora (2020).

# Resultados e discussões - Tração

- Houve um pequeno aumento no módulo de elasticidade com o acréscimo de PAE, porém uma redução na tensão máxima suportada em tração, o que indica que o material, apesar de mais rígido, torna-se menos resistente.

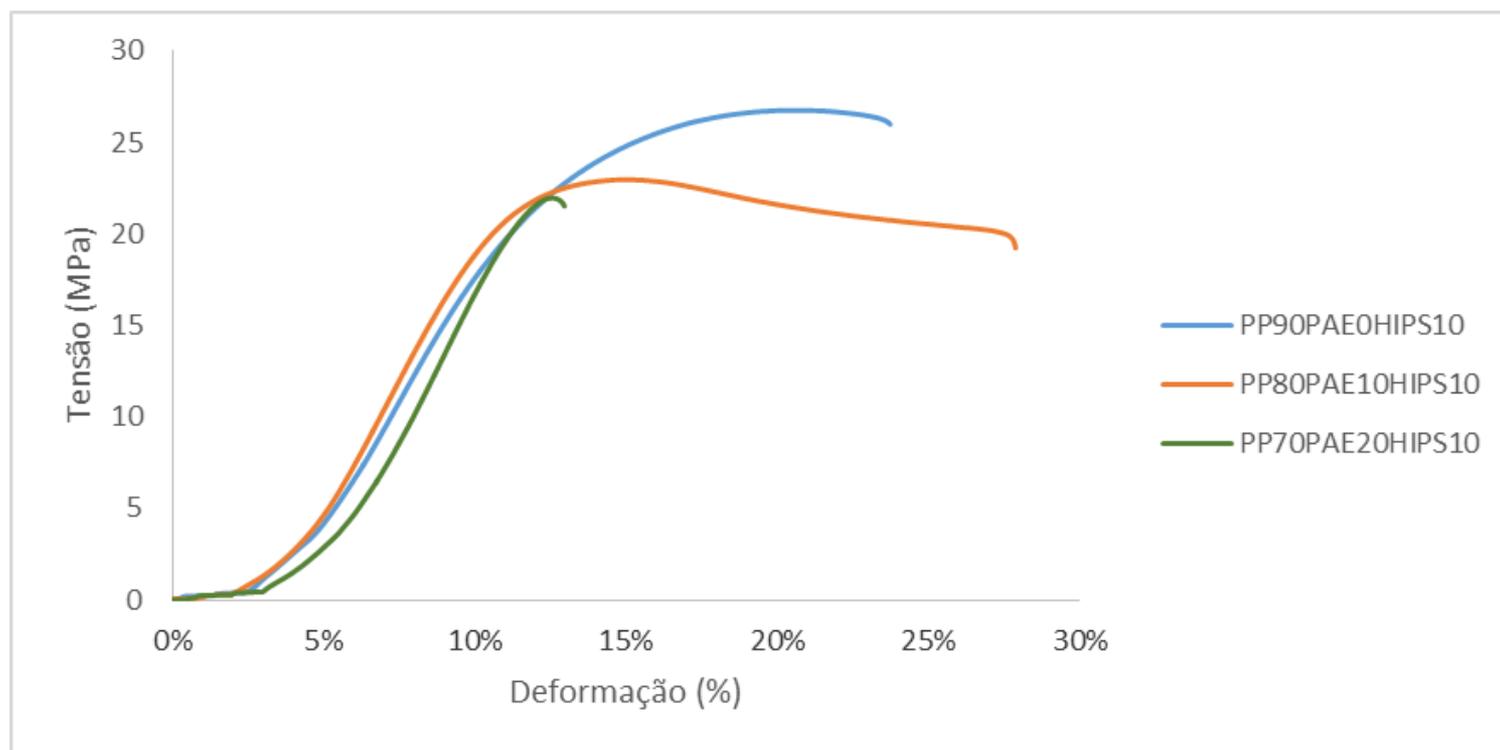
Amostra	% PP	% PAE	% HIPS	Módulo de elasticidade (MPa)	Tensão Máxima (MPa)
PP <sub>90</sub> PAE <sub>10</sub> HIPS <sub>0</sub>	90	10	0	301 ± 24,78	28 ± 1,25
PP <sub>80</sub> PAE <sub>20</sub> HIPS <sub>0</sub>	80	20	0	317 ± 12,08	25 ± 0,47

FONTE: Autora (2020).

- Adição de HIPS à composição foi feita para compatibilizar melhor as fases do compósito e, dessa forma, contribuir para o aumento nas propriedades mecânicas.

# Resultados e discussões - Tração

- A inclusão do HIPS no compósito aumentou a deformação do material, alongando a zona elástica e influenciando também o módulo de elasticidade. Já o teor de PAE não alterou a zona elástica dos compósitos, porém continua se observando que o aumento desse teor afeta a tenacidade.



FONTE: Autora (2020).

# Resultados e discussões - Tração

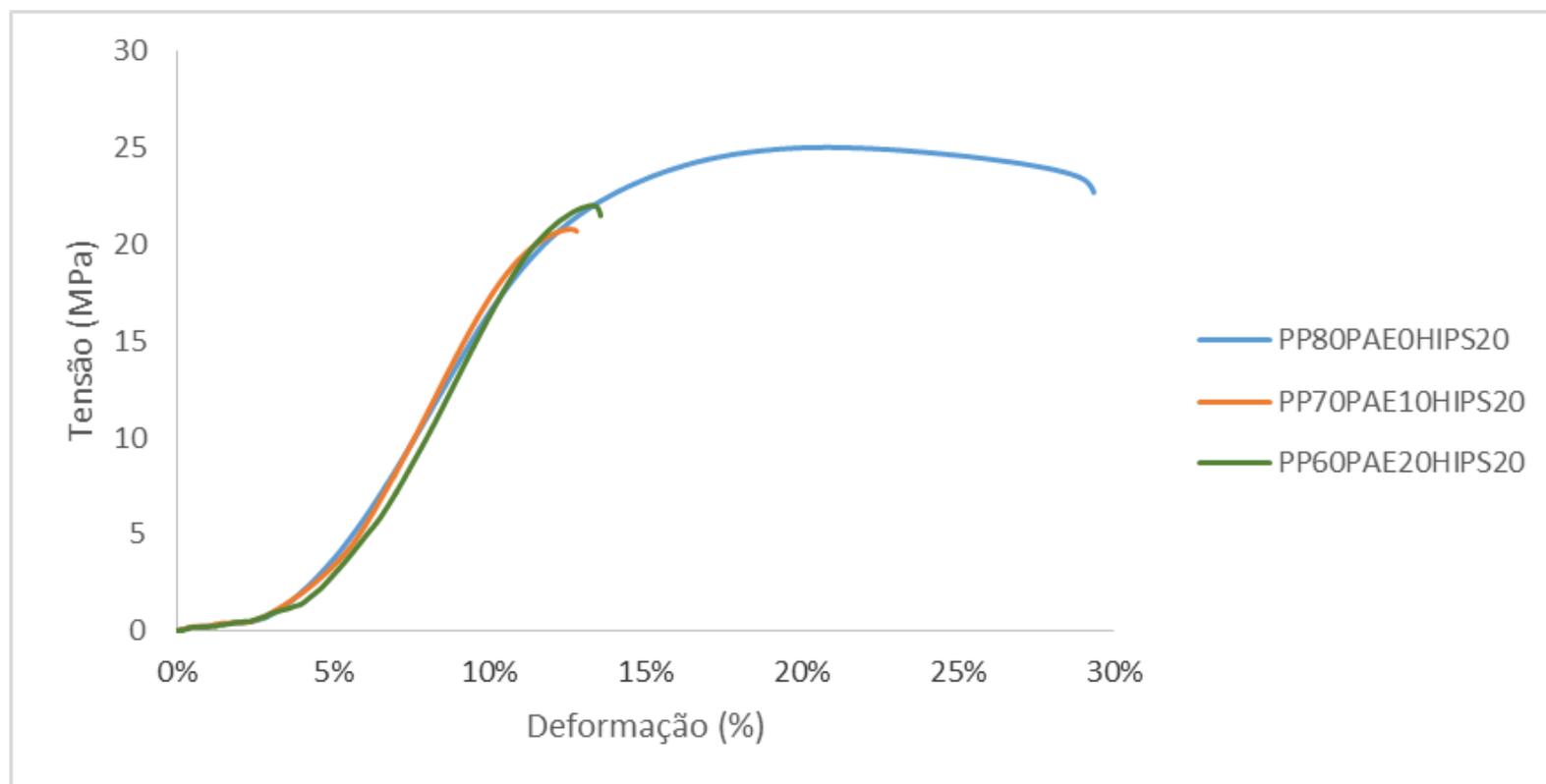
- Houve um aumento do módulo de elasticidade com a inserção do HIPS, mas também pode-se verificar o aumento do módulo de elasticidade com o aumento do teor de PAE e conseqüentemente a queda da tensão máxima nos compósitos.

Amostra	% PP	% PAE	% HIPS	Módulo de elasticidade (MPa)	Tensão Máxima (MPa)
PP <sub>90</sub> PAE <sub>0</sub> HIPS <sub>10</sub>	90	0	10	293 ± 3,30	27 ± 0,47
PP <sub>80</sub> PAE <sub>10</sub> HIPS <sub>10</sub>	80	10	10	314 ± 8,50	23 ± 0,47
PP <sub>70</sub> PAE <sub>20</sub> HIPS <sub>10</sub>	70	20	10	333 ± 12,28	22 ± 0,47

FONTE: Autora (2020).

# Resultados e discussões - Tração

- Os materiais com teores de 10% e 20% de PAE apresentam uma diminuição na área abaixo da curva, quando comparados ao material com somente PP e HIPS, mantendo o padrão de queda da tenacidade.



FONTE: Autora (2020).

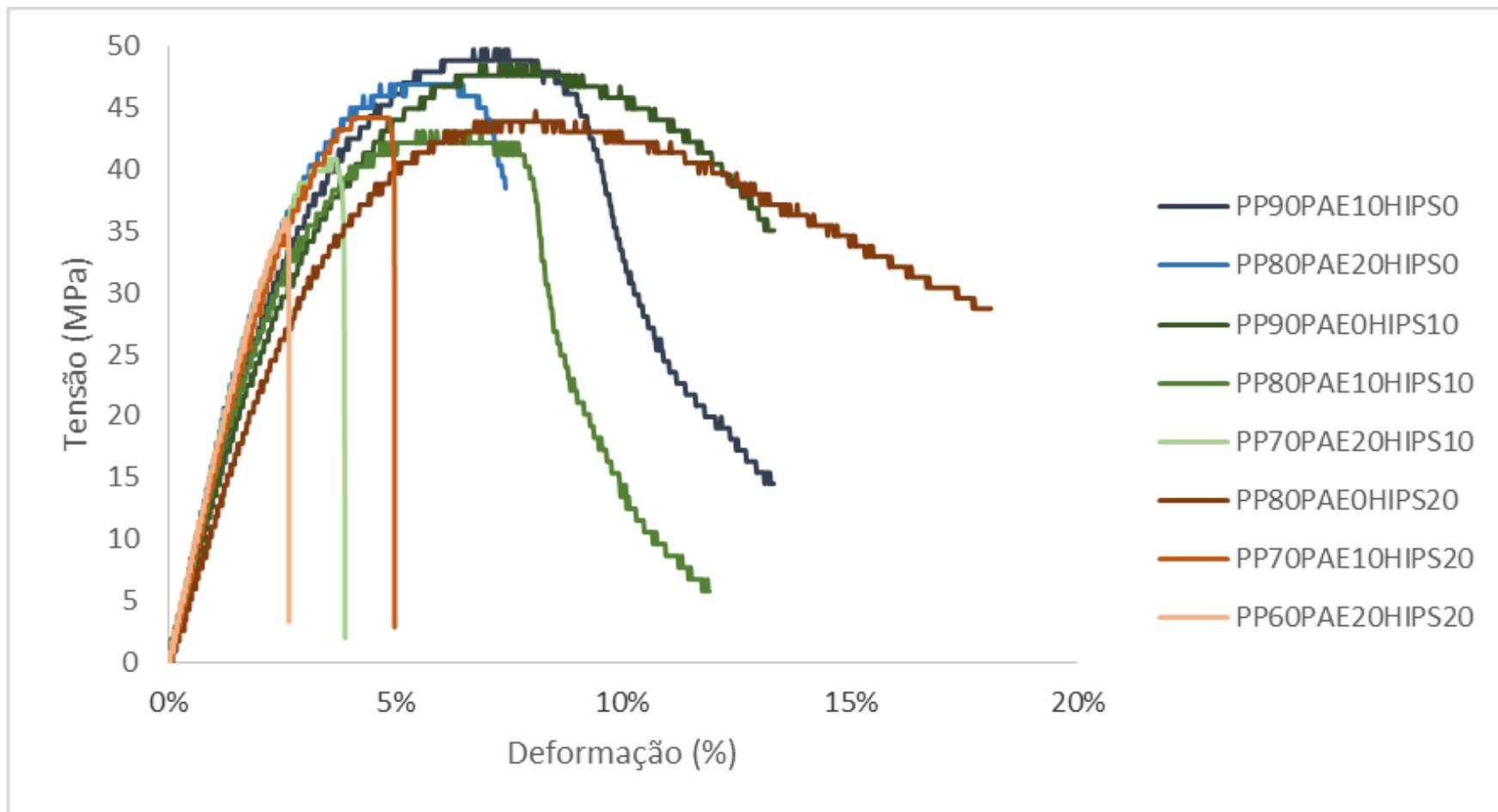
# Resultados e discussões - Tração

- Houve aumento significativo de 11% no módulo de elasticidade após a inserção do PAE no compósito com 20% de HIPS. Porém a variação do teor de PAE não afeta esse valor, gerando somente uma queda não significativa na tensão máxima do material. Queda essa que também pode ser explicada pela queda do teor de PP na composição do compósito final.

Amostra	% PP	% PAE	% HIPS	Módulo de elasticidade (MPa)	Tensão Máxima (MPa)
PP <sub>80</sub> PAE <sub>0</sub> HIPS <sub>20</sub>	80	0	20	283 ± 4,78	25 ± 0,47
PP <sub>70</sub> PAE <sub>10</sub> HIPS <sub>20</sub>	70	10	20	316 ± 8,22	21 ± 0,82
PP <sub>60</sub> PAE <sub>20</sub> HIPS <sub>20</sub>	60	20	20	316 ± 34,55	22 ± 2,16

FONTE: Autora (2020).

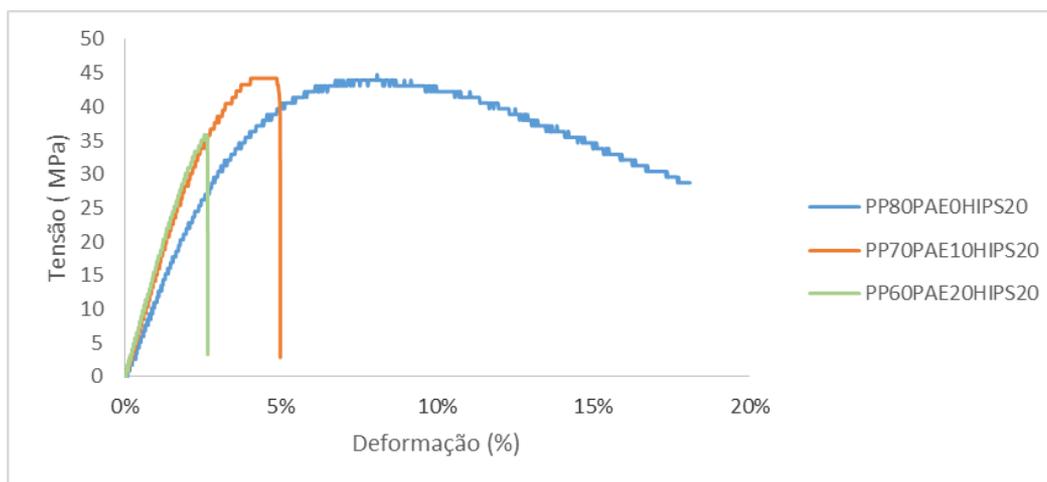
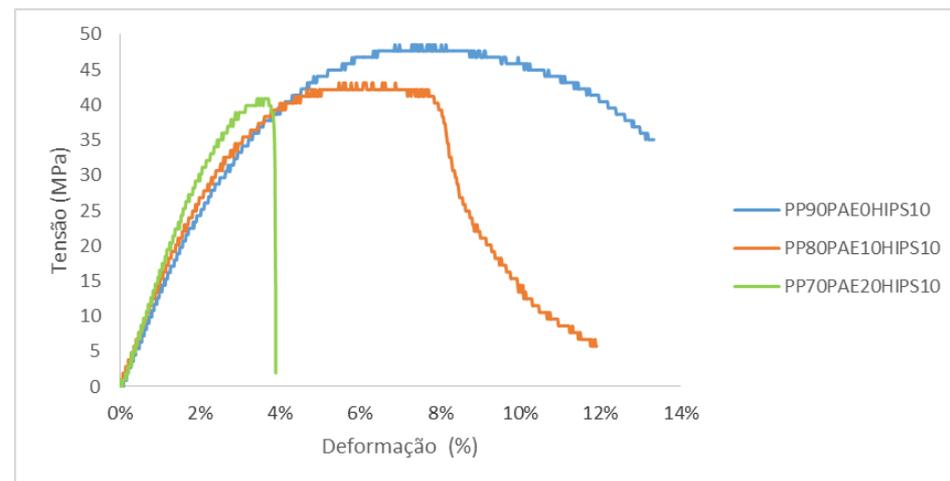
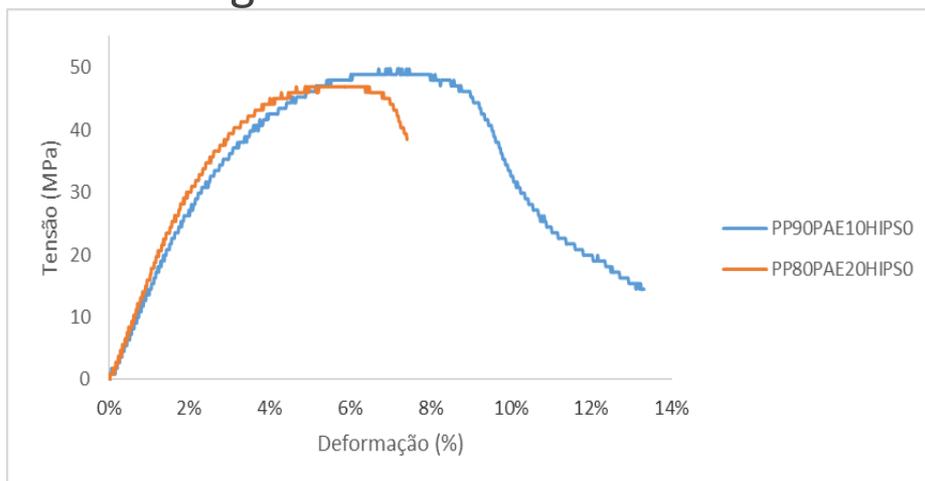
# Resultados e discussões - Flexão



FONTE: Autora (2020).

# Resultados e discussões - Flexão

- Verifica-se o comportamento de rigidez do material pela curva do gráfico de flexão.



FONTE: Autora (2020).

# Resultados e discussões - Flexão

- A tensão máxima de flexão diminuiu 5,7 % com o aumento do teor de PAE. Quanto ao módulo de elasticidade em flexão, houve um aumento significativo, indicando um aumento de 21,9% na rigidez do material com a adição de pó.

Amostra	% PP	% PAE	% HIPS	Módulo de elasticidade (MPa)	Tensão Máxima de flexão (MPa)
PP <sub>90</sub> PAE <sub>10</sub> HIPS <sub>0</sub>	90	10	0	1440 ± 72,37	49,79 ± 1,62
PP <sub>80</sub> PAE <sub>20</sub> HIPS <sub>0</sub>	80	20	0	1755 ± 118,24	46,94 ± 1,69

Amostra	% PP	% PAE	% HIPS	Módulo de elasticidade (MPa)	Tensão Máxima de flexão (MPa)
PP <sub>90</sub> PAE <sub>0</sub> HIPS <sub>10</sub>	90	0	10	1379 ± 83,20	48,57 ± 0,72
PP <sub>80</sub> PAE <sub>10</sub> HIPS <sub>10</sub>	80	10	10	1541 ± 46,30	43,14 ± 1,52
PP <sub>70</sub> PAE <sub>20</sub> HIPS <sub>10</sub>	70	20	10	1725 ± 81,49	40,88 ± 1,86

Amostra	% PP	% PAE	% HIPS	Módulo de elasticidade (MPa)	Tensão Máxima de flexão (MPa)
PP <sub>80</sub> PAE <sub>0</sub> HIPS <sub>20</sub>	80	0	20	1372 ± 15,19	48,16 ± 0,32
PP <sub>70</sub> PAE <sub>10</sub> HIPS <sub>20</sub>	70	10	20	1541 ± 95,83	44,22 ± 1,89
PP <sub>60</sub> PAE <sub>20</sub> HIPS <sub>20</sub>	60	20	20	1573 ± 46,74	35,85 ± 2,16

FONTE: Autora (2020).

# Resultados e discussões - Dureza

- Observar-se que a composição dos materiais não apresentou grande influência na dureza Shore-D, visto que a variação da dureza shore D não foi estatisticamente significativa.

Amostra	%PP	%PAE	%HIPS	Dureza Shore D
PP <sub>90</sub> PAE <sub>10</sub> HIPS <sub>0</sub>	90	10	0	68,27 ± 1,60
PP <sub>80</sub> PAE <sub>20</sub> HIPS <sub>0</sub>	80	20	0	67,37 ± 0,80
PP <sub>90</sub> PAE <sub>0</sub> HIPS <sub>10</sub>	90	0	10	65,97 ± 1,82
PP <sub>80</sub> PAE <sub>10</sub> HIPS <sub>10</sub>	80	10	10	66,83 ± 1,27
PP <sub>70</sub> PAE <sub>20</sub> HIPS <sub>10</sub>	70	20	10	66,70 ± 1,58
PP <sub>80</sub> PAE <sub>0</sub> HIPS <sub>20</sub>	80	0	20	66,07 ± 1,74
PP <sub>70</sub> PAE <sub>10</sub> HIPS <sub>20</sub>	70	10	20	67,00 ± 2,89
PP <sub>60</sub> PAE <sub>20</sub> HIPS <sub>20</sub>	60	20	20	66,73 ± 0,90

FONTE: Autora (2020).

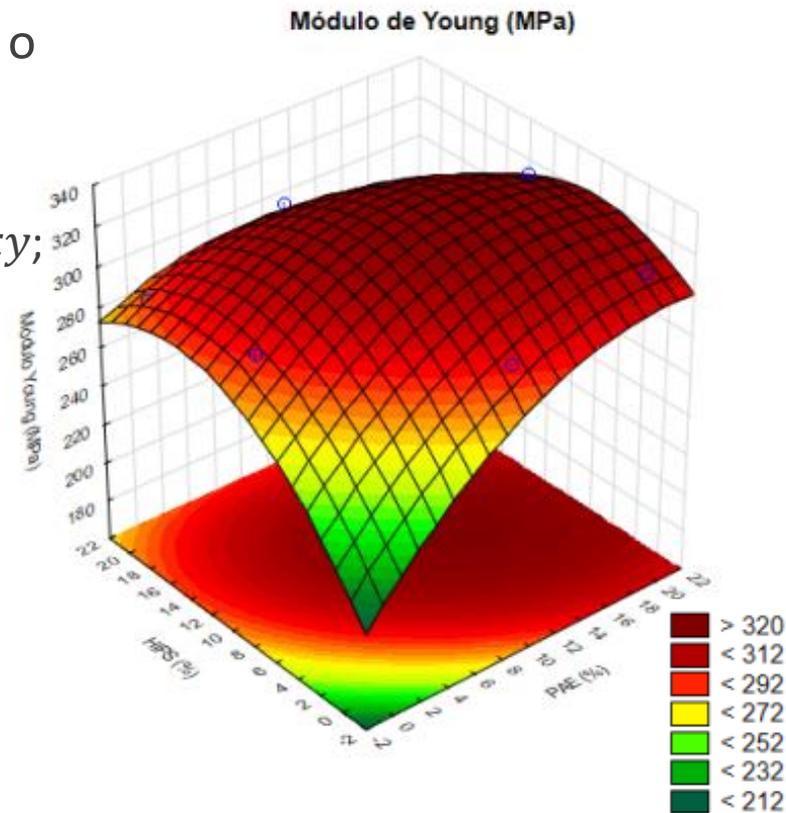
# Resultados e discussões - Módulo de Young

- Os teores de HIPS e PAE exercem influência positiva sobre o Módulo de Young num comportamento quadrático, o ponto ótimo encontra-se em concentrações intermediárias desses materiais.
- Método dos mínimos quadrados, onde  $x$  é o teor (%) de PAE e  $y$  o teor (%) de HIPS.

$$z = 241,78 + 7,22x - 0,189x^2 + 7,84y - 0,279y^2 - 0,191xy;$$

- A otimização do modelo se deu por meio da determinação do ponto cuja sua derivada é zero, com auxílio da plataforma WolframAlpha®. O ponto ótimo:

- %PAE = 14,51%
- %HIPS = 9,08%
- Módulo de Young = 329,77 MPa



FONTE: Autora (2020).

# Resultados e discussões - Módulo de Young

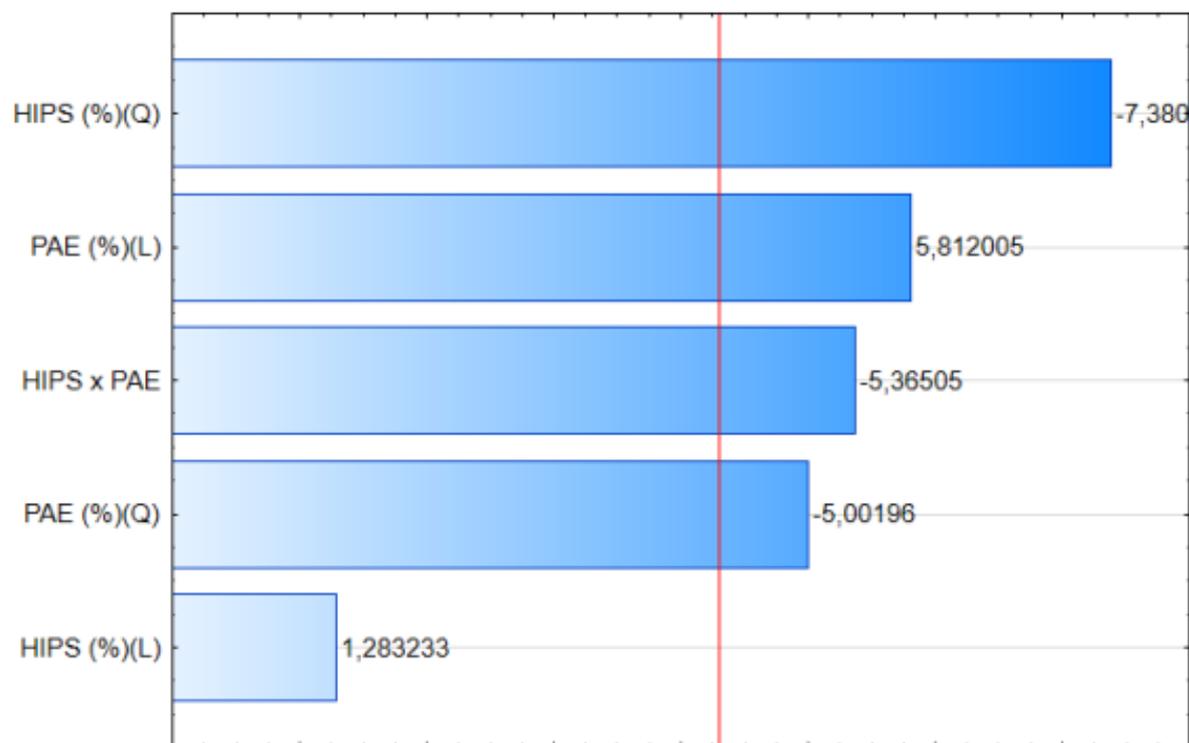
- Análise de variância
  - Há influência estatisticamente válida (valor-p < 0,05) do teor de PAE (em modelo linear e quadrático) e do teor de HIPS (em modelo quadrático), além de um efeito combinado dos dois materiais.

	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	valor-p
<b>PAE (%) - L</b>	<b>752,248</b>	<b>1</b>	<b>752,248</b>	<b>33,77940</b>	<b>0,028351</b>
<b>PAE (%) - Q</b>	<b>557,173</b>	<b>1</b>	<b>557,173</b>	<b>25,01965</b>	<b>0,037722</b>
HIPS (%) - L	36,671	1	36,671	1,64669	0,328020
<b>HIPS (%) - Q</b>	<b>1213,093</b>	<b>1</b>	<b>1213,093</b>	<b>54,47349</b>	<b>0,017867</b>
<b>PAE x HIPS (L<sup>2</sup>)</b>	<b>640,999</b>	<b>1</b>	<b>640,999</b>	<b>28,78380</b>	<b>0,033030</b>
Erro	44,539	2	22,269		
Total	2044,809	7			

FONTE: Autora (2020).

# Resultados e discussões - Módulo de Young

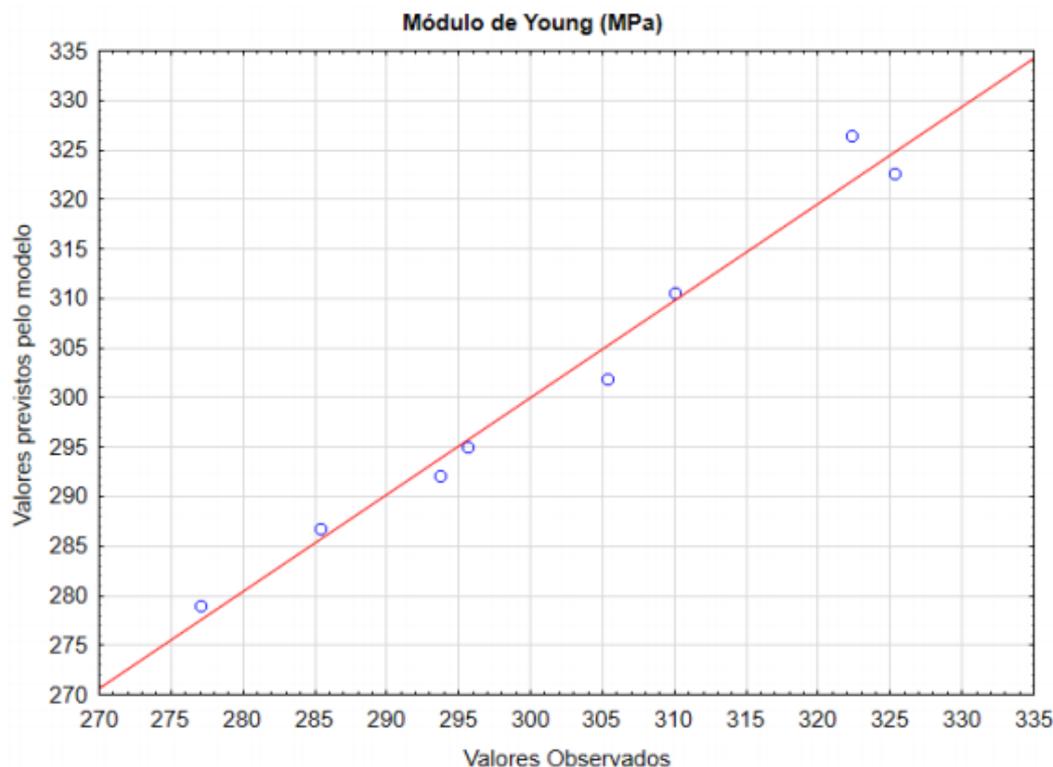
- Gráfico de Pareto
  - O efeito observado no material combinado foi justamente o que se buscava ao adicionar o HIPS à composição do material final.



FONTE: Autora (2020).

# Resultados e discussões - Módulo de Young

- Ajuste do modelo aos observados
  - Foi obtido um coeficiente de correlação  $R^2 = 0,9782$ , que caracteriza um ajuste bastante satisfatório. Assim, uma vez validado por análise de variância, o modelo pode ser utilizado para prever os valores do módulo de Young em função da composição.



FONTE: Autora (2020).

# Resultados e discussões - Tensão Máxima em tração

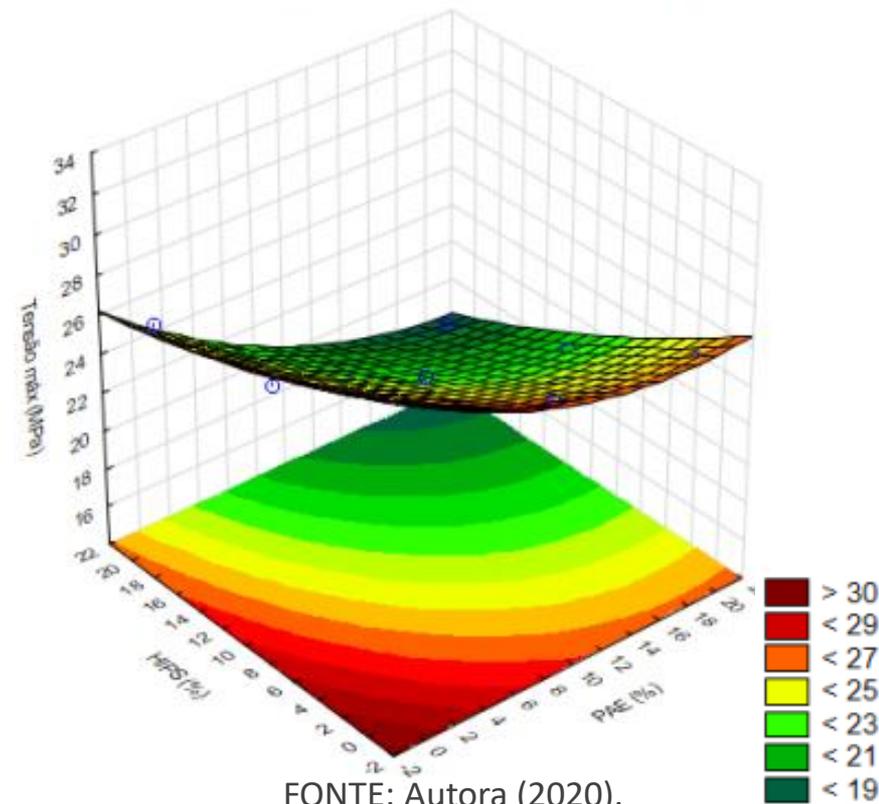
- A resistência a tração tende a diminuir com a inserção do PAE. A adição de HIPS às composições contendo PAE parece não impedir a redução na propriedade, o inverso do que aconteceu com o Módulo de Young, o que pode ser explicado pela fraca interação matriz x reforço.

Tensão máxima em Tração (MPa)

- Método dos mínimos quadrados, onde  $x$  é o teor (%) de PAE e  $y$  o teor (%) de HIPS.

$$z = 29,91 - 0,47x + 0,013x^2 - 0,32y + 0,043y^2 - 0,0052xy$$

- Analisando-se o modelo e a superfície de resposta, verifica-se que o maior valor obtido para a tensão máxima encontra-se no polímero puro ( $x = 0, y = 0$ ), com valor de 29,91 MPa.



FONTE: Autora (2020).

# Resultados e discussões - Tensão Máxima em tração

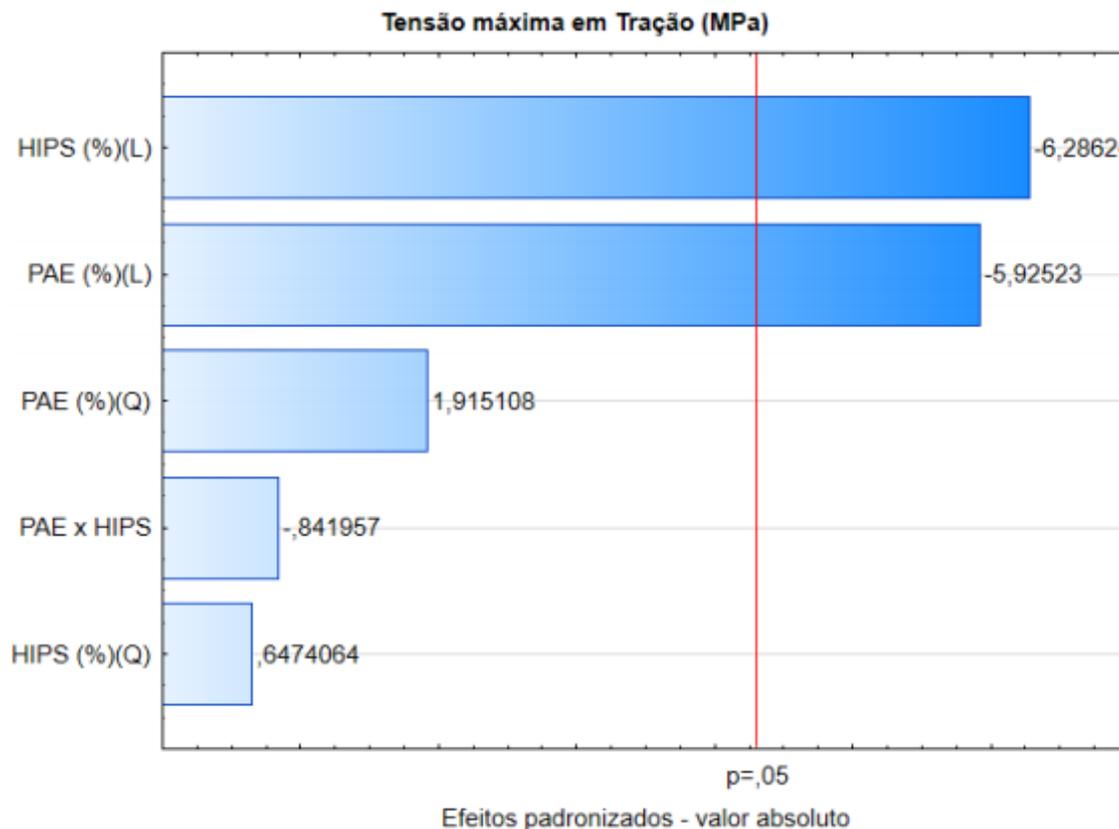
- Análise de variância
  - O teor de PAE e o de HIPS exercem influência sobre o resultado da Tensão máxima em Tração, uma vez que apresentaram valor-p < 0,05. Porém, não há efeito combinado estatisticamente significativo entre o PAE e HIPS, indicando que a adição de HIPS não contribui para impedir a diminuição da resistência à tração.

	<b>Soma Quadrática</b>	<b>Graus de Liberdade</b>	<b>Média Quadrática</b>	<b>F</b>	<b>valor-p</b>
<b>PAE (%) - L</b>	<b>23,694</b>	<b>1</b>	<b>23,694</b>	<b>35,108</b>	<b>0,027</b>
PAE (%) - Q	2,475	1	2,475	3,668	0,195
<b>HIPS (%) - L</b>	<b>26,669</b>	<b>1</b>	<b>26,669</b>	<b>39,517</b>	<b>0,024</b>
HIPS (%) - Q	0,28286	1	0,28286	0,419	0,583
PAE x HIPS (L <sup>2</sup> )	0,478	1	0,478	0,709	0,488
Erro	1,35	2	0,675		
Total	63,976	7			

FONTE: Autora (2020).

# Resultados e discussões - Tensão Máxima em tração

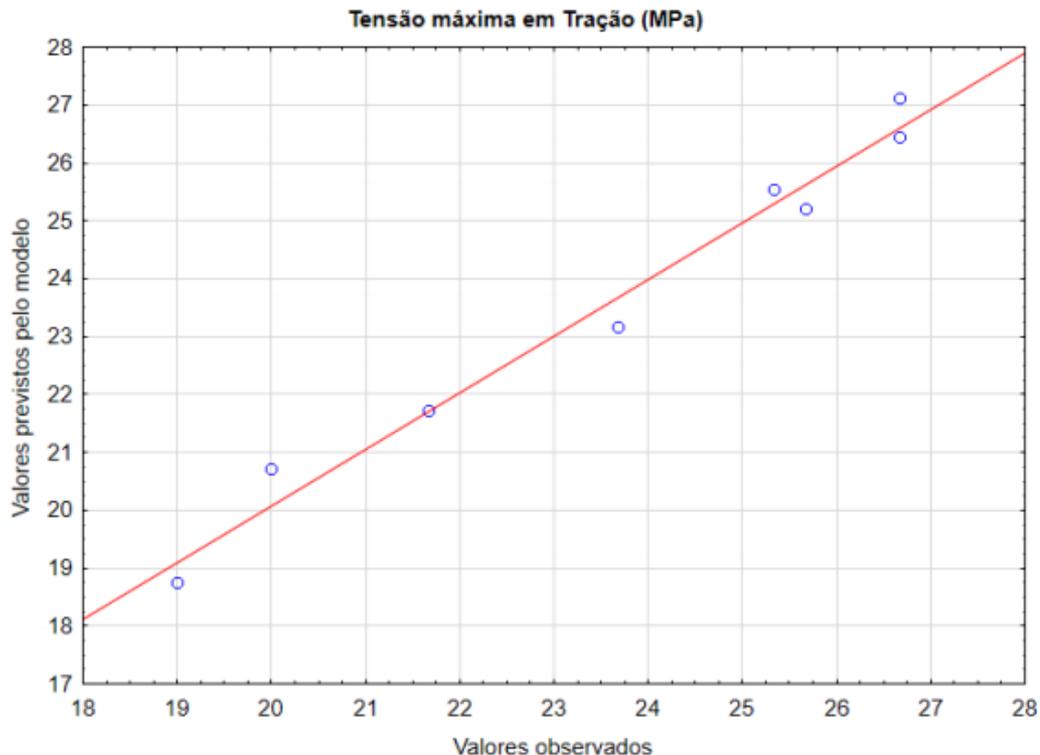
- Gráfico de Pareto
  - A influência de cada variável sobre a Tensão máxima em Tração pode ser graficamente visualizada: Os efeitos padronizados de cada variável e o limite para a validade estatística ( $p < 0,05$ ).



FONTE: Autora (2020).

# Resultados e discussões - Tensão Máxima em tração

- Ajuste do modelo aos observados
  - O valor calculado para o coeficiente de correlação foi de  **$R^2 = 0,9789$** , representando um ajuste satisfatório e estatisticamente válido para a previsão da Tensão máxima em Tração a partir da composição do material.



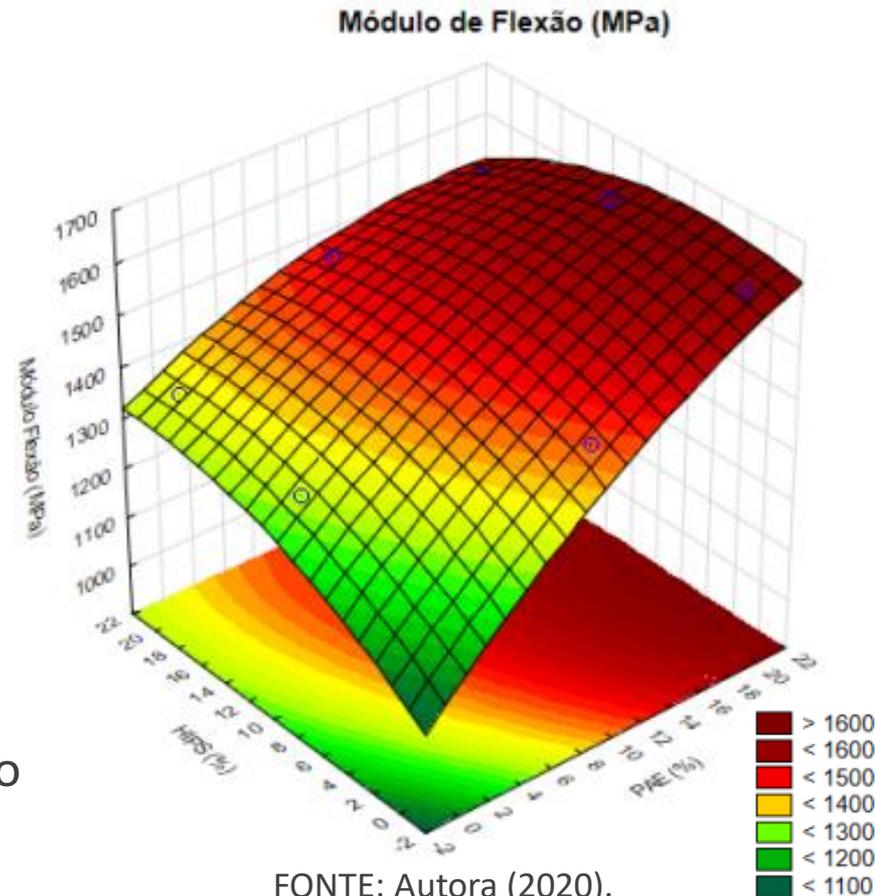
FONTE: Autora (2020).

# Resultados e discussões - Módulo de flexão

- O comportamento indica que a adição de HIPS e a de PAE contribuem para um aumento na rigidez do material em flexão, que, nos experimentos realizados, apresentou valor máximo de 1630 MPa.
- Método dos mínimos quadrados, onde  $x$  é o teor (%) de PAE e  $y$  o teor (%) de HIPS.

$$z = 1192,06 + 28,98x - 0,41x^2 + 17,08y - 0,45y^2 - 0,579xy$$

- O ponto ótimo obtido foi:
  - %PAE = 40,20%
  - %HIPS = 6,89%
  - Módulo de Young = 1715 MPa
- O modelo indica adicionar 40% de pó, porém tal concentração é inaplicável do ponto de vista do processamento do material.



# Resultados e discussões - Módulo de flexão

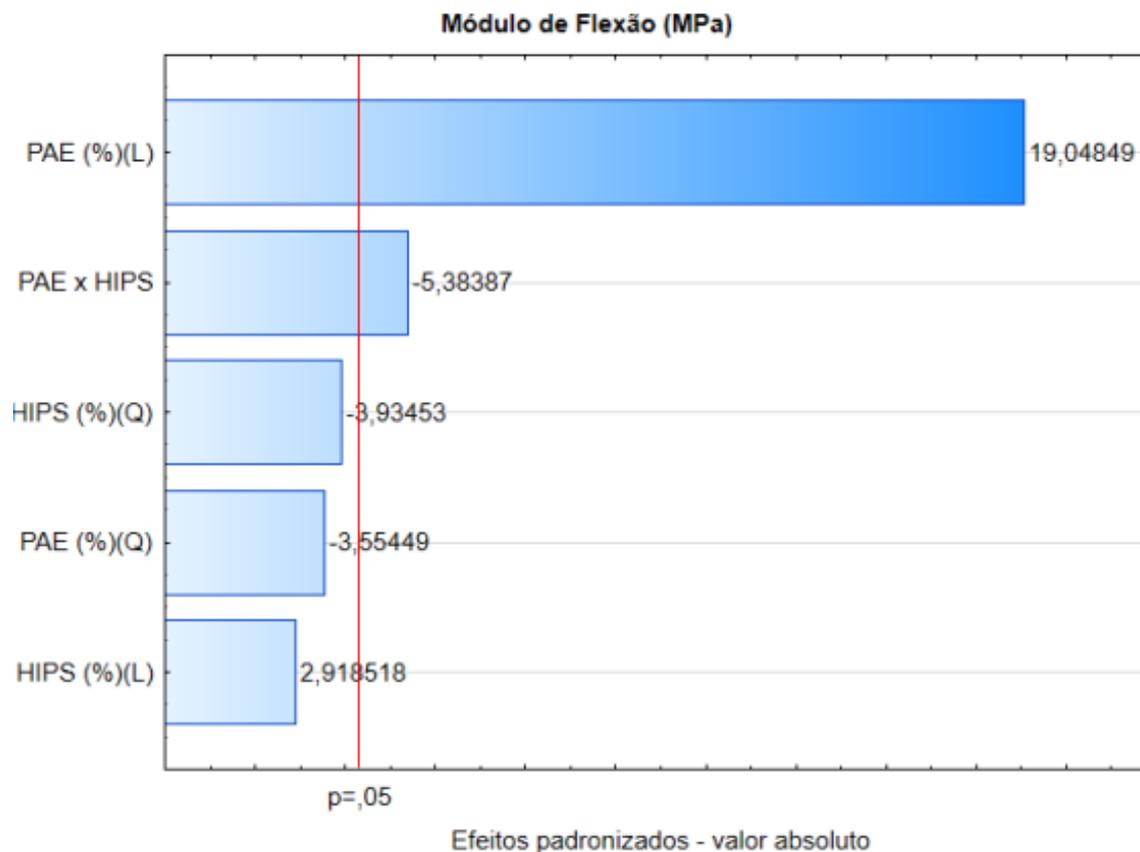
- Análise de variância
  - Os resultados obtidos na análise de variância, que mostrou efeitos estatisticamente significativos (valor-p < 0,05) para o teor de PAE em modelo linear e para o efeito combinado entre o PAE e HIPS.

	<b>Soma Quadrática</b>	<b>Graus de Liberdade</b>	<b>Média Quadrática</b>	<b>F</b>	<b>valor-p</b>
<b>PAE (%) - L</b>	<b>73438,91</b>	<b>1</b>	<b>73438,91</b>	<b>362,8448</b>	<b>0,002745</b>
PAE (%) - Q	2557,17	1	2557,17	12,6344	0,070841
HIPS (%) - L	1723,97	1	1723,97	8,5177	0,100086
HIPS (%) - Q	3133,22	1	3133,22	15,4805	0,058944
<b>PAE x HIPS (L<sup>2</sup>)</b>	<b>5866,72</b>	<b>1</b>	<b>5866,72</b>	<b>28,9861</b>	<b>0,032811</b>
Erro	404,80	2	202,40		
Total	84526,44	7			

FONTE: Autora (2020).

# Resultados e discussões - Módulo de flexão

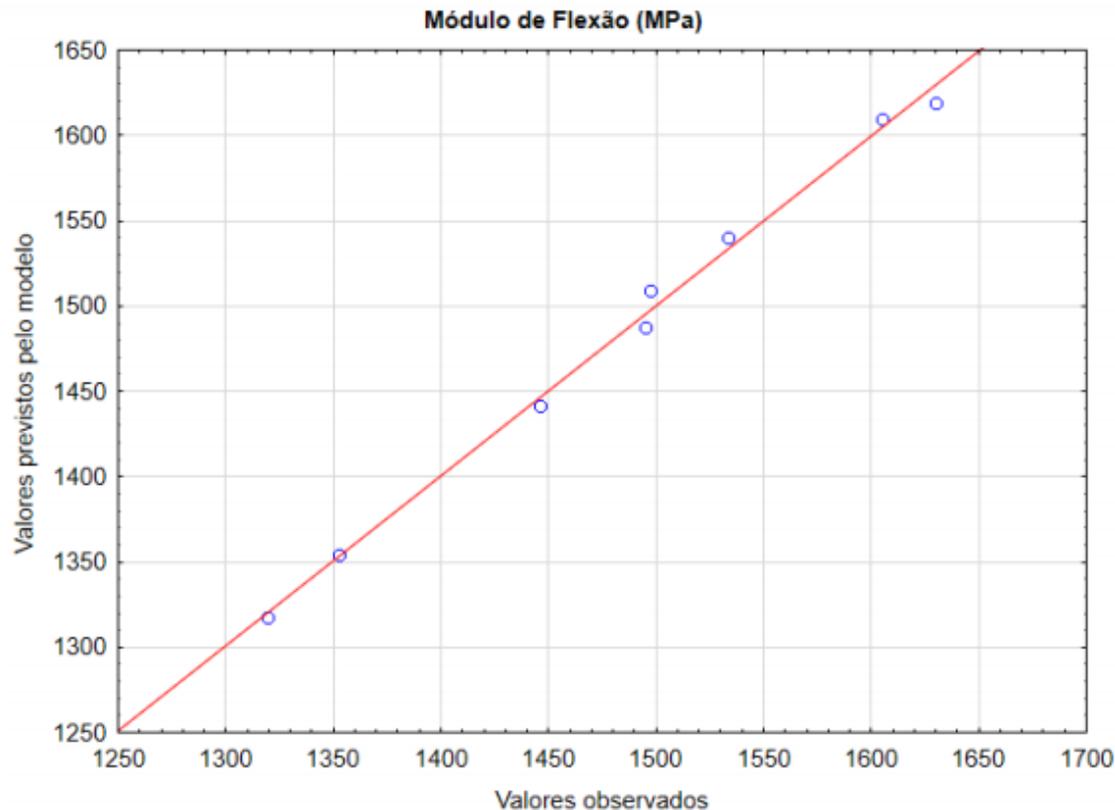
- Gráfico de Pareto
  - A validade estatística dos efeitos observados por análise de variância pode ser analisada.



FONTE: Autora (2020).

# Resultados e discussões - Módulo de flexão

- Ajuste do modelo aos observados
  - O coeficiente de correlação calculado foi de  **$R^2 = 0,9952$** . Tal valor indica um ajuste excelente em relação os valores observados experimentalmente versus aqueles previstos pelo modelo matemático.



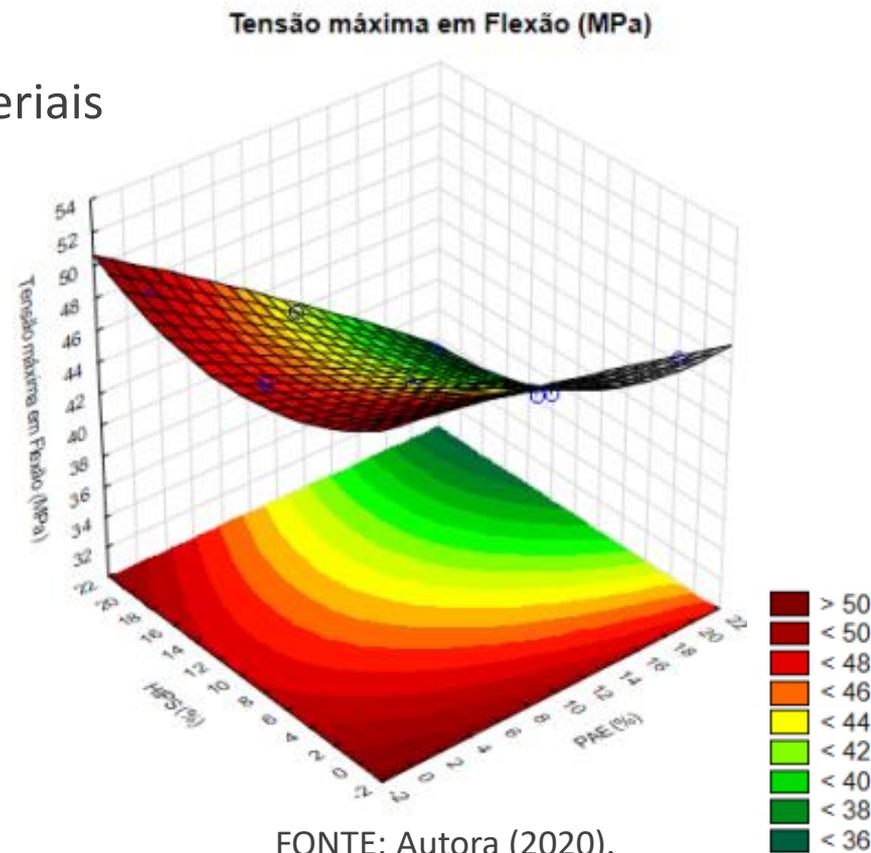
FONTE: Autora (2020).

# Resultados e discussões - Tensão máxima em flexão

- Existe uma influência individual do PAE e do HIPS que pode ser vista, na área vermelha das curvas de nível. A composição contendo 20% de HIPS sem adição de PAE foi aquela que apresentou maior valor de Tensão máxima em Flexão.
- Não há efeito combinado dos dois materiais sobre a propriedade mecânica.
- Método dos mínimos quadrados, onde  $x$  é o teor (%) de PAE e  $y$  o teor (%) de HIPS.

$$z = 50,21 - 0,18x - 0,022x^2 - 0,49y + 0,021y^2 - 0,018xy$$

- O comportamento verificado na superfície de resposta – influência individual dos teores de PAE e HIPS, sem efeito combinado – foi confirmado pela Análise de Variância.



# Resultados e discussões - Tensão máxima em flexão

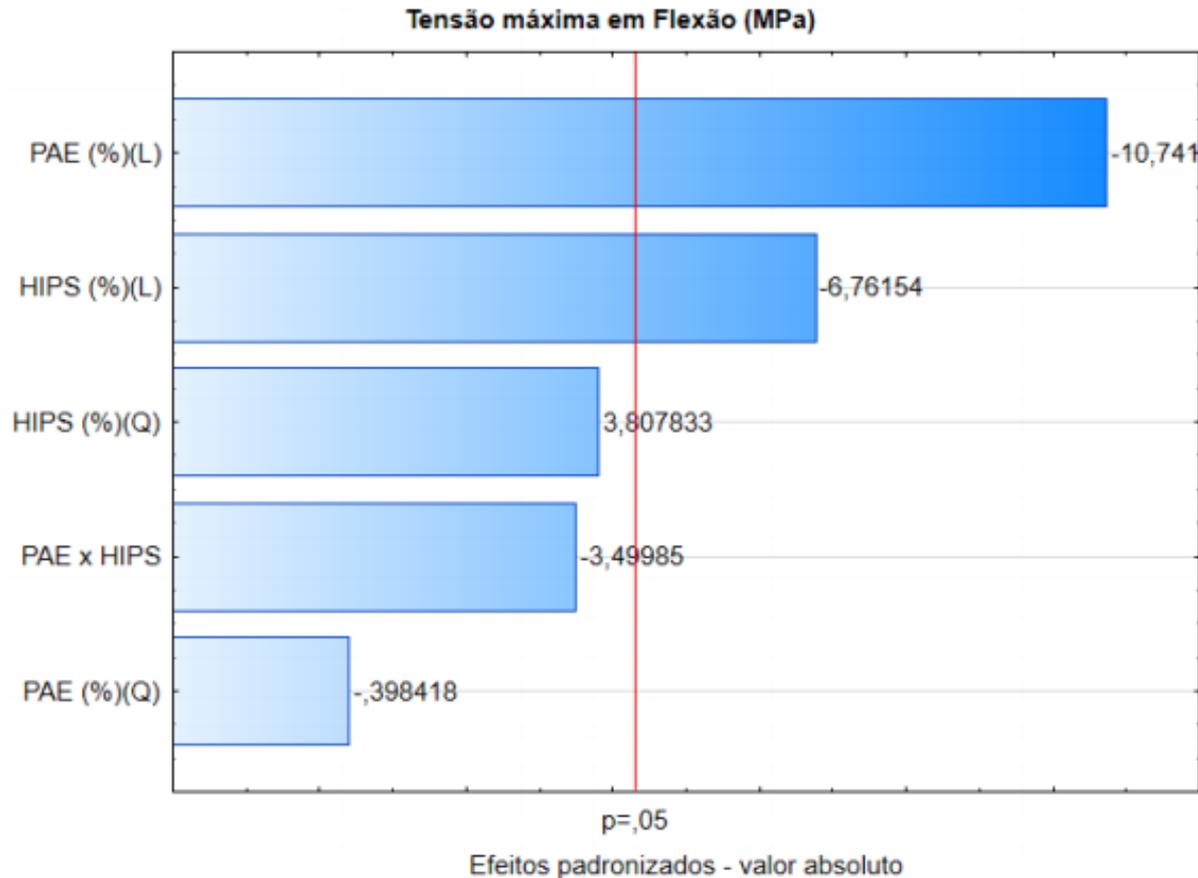
- Análise de variância
  - Observa-se que somente apresentaram efeitos estatisticamente válidos (valor-p < 0,05) os teores de PAE (em modelo linear) e de HIPS (em modelo linear).

	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	valor-p
<b>PAE (%) - L</b>	<b>53,6615</b>	<b>1</b>	<b>53,66148</b>	<b>115,3750</b>	<b>0,008556</b>
PAE (%) - Q	0,0738	1	0,07383	0,1587	0,728831
<b>HIPS (%) - L</b>	<b>21,2639</b>	<b>1</b>	<b>21,26385</b>	<b>45,7184</b>	<b>0,021181</b>
HIPS (%) - Q	6,7438	1	6,74383	14,4996	0,062565
PAE x HIPS (L <sup>2</sup> )	5,6970	1	5,69703	12,2489	0,072833
Erro	0,9302	2	0,46510		
Total	128,3500	7			

FONTE: Autora (2020).

# Resultados e discussões - Tensão máxima em flexão em flexão

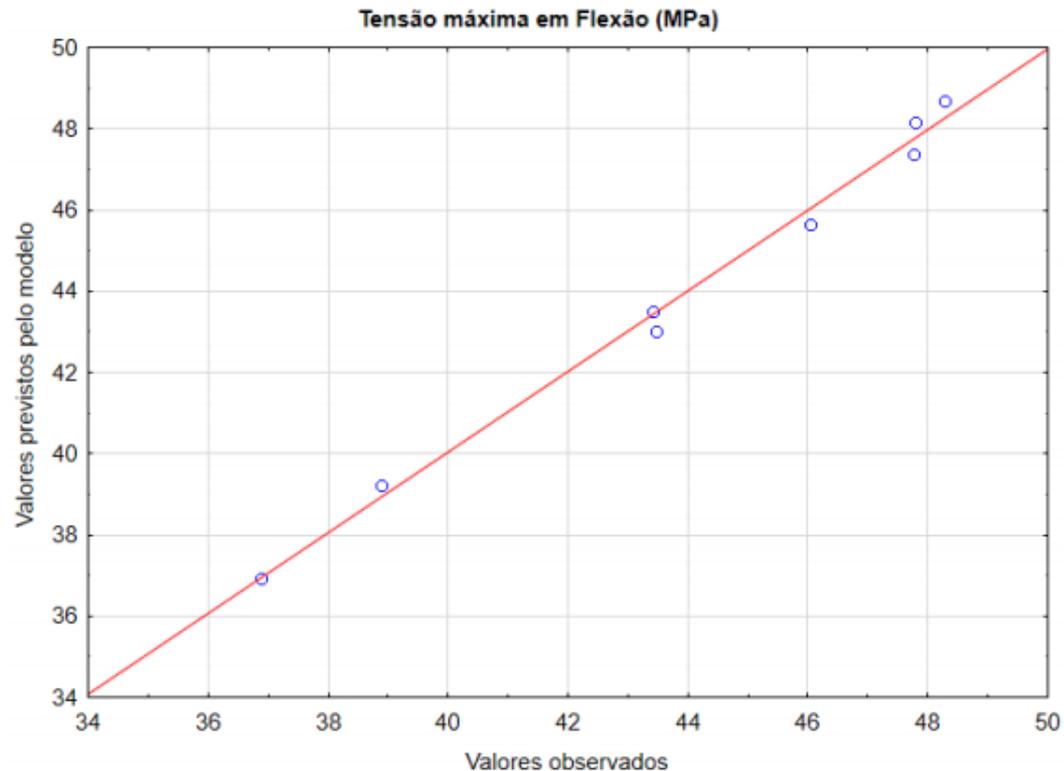
- Gráfico de pareto
  - A validade estatística dos efeitos observados por análise de variância pode ser analisada.



FONTE: Autora (2020).

# Resultados e discussões - Tensão máxima em flexão

- Ajuste do modelo aos observados
  - O coeficiente de correlação obteve um valor de  $R^2 = 0,9928$ , que caracteriza um ajuste excelente e permite, uma vez validado por Análise de Variância, utilizar o modelo para prever o comportamento desta propriedade mecânica em função da composição do material.



FONTE: Autora (2020).

# Conclusões

---

- Foi possível obter compósitos homogêneos, entende-se que há homogeneidade nos materiais em função dos baixos valores de desvio-padrão encontrados, bem como pela validade estatística dos resultados analisados;
- A adição de PAE e HIPS contribuiu para um aumento na rigidez dos materiais, tanto em tração quanto em flexão;
- A composição com maior rigidez foi aquela com 20% de PAE e 10% de HIPS, que atingiu Módulo de Young de 325 MPa e Módulo de Flexão de 1630 MPa;
- Com relação à dureza, os compósitos apresentaram, em média, 66,9 HD e não foi observada nenhuma variação significativa em função da composição;
- Por meio da análise multivariada, foi possível verificar que a composição exerce influência estatisticamente significativa sobre o módulo e a resistência tanto em tração quanto em flexão;
- A análise permitiu observar que há, ainda, efeito combinado dos teores de PAE e HIPS sobre os módulos de Young e de Flexão. Assim, entende-se que a utilização do HIPS na composição permitiu reduzir a influência negativa promovida pelo PAE devido à fraca interação matriz-reforço.

# Sugestões para trabalhos futuros

---

- Analisar a interação da matriz e reforço dos compósitos através de imagens microscópicas.
- Realizar um estudo econômico-financeiro para a produção do compósito.
- Estudar a possibilidade de processamento desse compósito com uma porcentagem de 40% de PAE.
- Verificar o uso de outros resíduos siderúrgicos como reforço para analisar a influencia do teor do resíduo e do HIPS no material.



OBRIGADA!

---